

**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS
MINISTRY OF INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

HARARE INSTITUTE OF TECHNOLOGY

UNITARY ENTERPRISE «STC «LEMT» BELOMO»

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

INSTRUMENTATION ENGINEERING – 2025

**Proceedings
of the 18th International Scientific and Technical Conference**

November 13–15, 2025
Minsk, Republic of Belarus

**Minsk
BNTU
2025**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТРЕСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХАРАРЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «НТЦ «ЛЭМТ» БЕЛОМО»
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2025

**Материалы
18-й Международной научно-технической конференции**

13–15 ноября 2025 года
Минск, Республика Беларусь

**Минск
БНТУ
2025**

УДК 681.2(063)
ББК 34.9я431
П75

Редакционная коллегия:

канд. техн. наук, доцент *А. И. Свистун* (председатель);
д-р техн. наук, профессор *О. К. Гусев*, канд. техн. наук, доцент *Р. И. Воробей*;
д-р физ.-мат. наук, доцент *М. А. Князев*; д-р техн. наук, профессор *П. С. Серенков*;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, профессор *А. М. Малярович*;
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *Ю. М. Плескачевский*;
канд. техн. наук, доцент *А. Л. Савченко*; д-р техн. наук, профессор *В. Л. Соломахо*;
канд. техн. наук, доцент *А. К. Тявловский*; канд. техн. наук, доцент *О. Г. Реутская*;
академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *С. А. Чижик*;
канд. техн. наук, доцент *Н. Н. Ризноокая* (отв. секретарь)

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *А. Л. Толстик*;
д-р физ.-мат. наук, профессор *И. А. Гончаренко*

Издание включает материалы 18-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2025» по направлениям: интеллектуальные приборы и системы; сенсорика; фотоника, оптоэлектронные и лазерные системы и технологии; биомедицинская инженерия; метрологическое обеспечение и управление качеством; фундаментальные и прикладные аспекты приборостроения; формирование индустрии 5.0: синергия интеллектуальной автоматизации, цифровой коммуникации и передовой электроники для устойчивого интеллектуального будущего.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

UDC 681

AUTO-GAIN METHOD FOR STABILIZING SINUSOIDAL SIGNALS OF OPTICAL ENCODERS

Di Chang¹, Yatao Huang¹, Peng Sun², Yao Wang², Siyuan Hu²

¹*School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology*

²*School of Artificial Intelligence, Harbin University
Harbin, China*

Abstract. Optical encoders are widely used in precision positioning, yet signal amplitude attenuation due to grating tilt degrades phase resolution and linearity. In this manuscript, we analysed the amplitude-related resolution and proposed an auto-gain method based on programmed gain control and the CORDIC algorithm to stabilize sinusoidal signals. Experimental results demonstrate that the method amplifies signal amplitudes by approximately 11 times and reduces displacement nonlinearity by 69 %, significantly enhancing measurement resolution and stability. The approach is implemented on an FPGA-based phasemeter platform using programmable gain amplifiers and digital potentiometers, offering effective signal conditioning for optical encoders under varying operational conditions.

Keywords: auto-gain module, optical encoder, signal amplitude, CORDIC algorithm.

*Address for correspondence: Di Chang, No. 92, Xidazhi Str., Harbin 150001, Heilongjiang Province, China
e-mail: di.chang@hit.edu.cn*

According to a survey from the Japan Society for Precision Engineering (JSPE), the optical encoder is the most widely used sensor for precise positioning [1]. Whether they are based on the Moiré fringe or the Talbot effect, high-resolution optical encoders use sine and cosine signals to measure phase and displacement information. The phase information is usually calculated using the CORDIC-based arctangent operations [2]. However, in practical applications, the unexpected tilt of the grating can lead to attenuations in signal amplitudes, thereby reducing the phase and displacement resolution. Stabilizing the sinusoidal signals of optical encoders is an important issue for high-resolution displacement measurement.

Auto-gain control is an effective technique to provide sine and cosine signals with stable amplitudes for optical encoders [3]. In recent years, with the widespread application of FPGA in the field of phase quadrature measurement, algorithms in FPGA are used with programmed gain control to achieve stable signal amplitudes. For example, Wang et al. reported an auto-gain module for good adaptability to reflectivity changes of a homodyne interferometric vibrometer [4]. Wang's algorithm detects maximum amplitudes of sine and cosine signals and calculates the gain factor of the programmed gain control. The algorithm for maximum amplitude detection is to take the average of the signal over 0.1 s. However, dynamic calculation is an important but underappreciated issue in their work. The maximum amplitude detection algorithm based on average values does not have good real-time performance and is only suitable for applications with dynamic signals, such as vibrometers. The average-based method is not always effective for quasi-static measurements and is not suitable for optical encoders.

We first defined the actual phase solution with the ratio of the signal amplitude M (in voltage) and the voltage resolution of the ADC u

$$R = 2\pi \frac{\pi}{M}. \quad (1)$$

We use mathematical software (GNU Octave, 9.3.0 version) to generate sine and cosine signals of different amplitudes for the standard phase. Then the signals are quantized, and the phase angle is calculated using the CORDIC algorithm. Phase error results of signals with different amplitudes are shown in Table 1.

Table 1 – Maximal phase deviation related to amplitudes

Normalized Amplitudes	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Maximal phase deviation / LSB	±3.12	±4.16	±5.16	±8.12	±15.23

Figure 1 shows the phase error between the ideal phase curve and the phase calculated by the signals with different amplitudes. The ideal phase results only have quantization and algorithm errors, which are used as the same baseline.

As shown in Fig. 1, *a*, the signal amplitude decreases, the signal-to-noise ratio deteriorates, and then the fluctuations caused by random errors increase. Besides, the value of systematic error caused by quantization and algorithms also increases, but its trend remains. As shown in Fig. 1, *b*, the phase error is significantly reduced to less than 8 LSBs of all the original signals with different amplitudes. Figure 2, *b* also shows that the curves produce a jump for every $\pi/4$ phase, but are continuous at $\pi/2$ and $3\pi/2$.

This phenomenon is consistent with the characteristics of the CORDIC algorithm for arctangent that the phase is calculated according to the quadrant and then assembled into a full 2π period. Therefore, we

consider this jump error to be caused by the DC component remaining in the sine and cosine signals. This also shows that the stabilized signal amplitudes have an obvious effect in maintaining effective resolution.

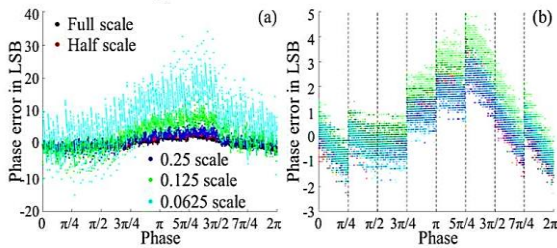


Figure 1 – Phase errors of the curves without (a) and with the proposed programmable gain control method (b)

To achieve stabilized signal amplitudes, we designed an auto-gain method based on programmed gain control (shown in Fig. 2). The proposed method uses a CORDIC-based algorithm to calculate the gain factor and two programmable gain amplifier circuits for controlling the sine and cosine signals.

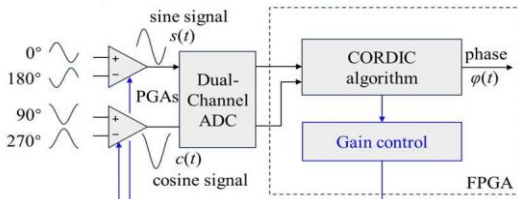


Figure 2 – Schematic of the proposed CORDIC-based auto-gain method.

Based on a homemade FPGA platform, we conducted experiments to validate the proposed method by using a commercial optical encoder reading head. The programmable gain amplifiers are implemented by two digital potentiometers. The hardware configuration is shown in Fig. 3. In the homemade phasemeter, differential sine and cosine signals after programmable-gain amplifiers are quantized by a 10-bit two-channel differential ADC. An FPGA is used for computing the algorithms in hardware. Phase information is acquired by system-level debugging tools of the FPGA in the phasemeter, and then is displayed by software on the computer.

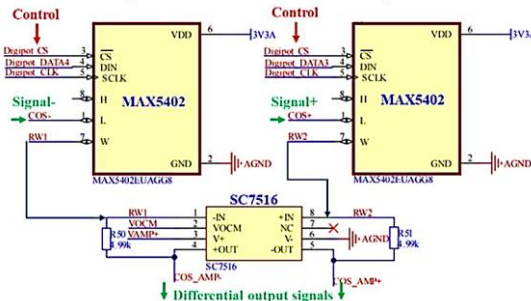


Figure 3 – Hardware configuration of the auto-gain module with differential amplifier and digital potentiometers

In Fig. 4, the sine and cosine signals are generated by a moving grating scale driven by the linear motion

platform and a commercial reading head (Celera Motion, M05).

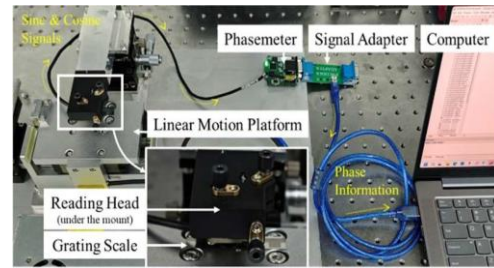


Figure 4 – Experimental setups with an optical encoder as the signal source.

The encoder is assembled in a suitable position for good signals, while the linear motion platform is reciprocating at a speed of 3 mm/s. The Lissajous figure and the corresponding displacement curves at a 20 μm motion with and without the proposed autogain method are shown in Fig. 5. The signals are deteriorated by adjusting the position and attitude of the sensor to an intentionally poor condition.

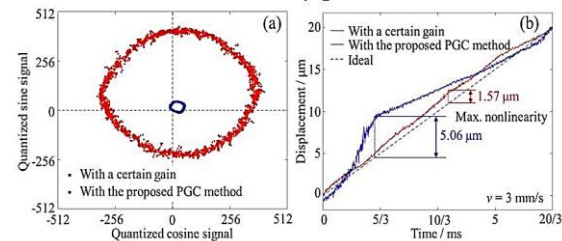


Figure 5 – Lissajous figures (a) and phase curves (b) with the optical encoder in a poor position.

As Fig. 5 shows, the Lissajous figure with a certain gain of amplifiers is quite small, while the signal amplitudes are enlarged about 11 times by the PGC method. The nonlinearity of the displacement curves also proves the effectiveness of the proposed method. As Fig. 5, b shows, the maximal nonlinearity reduced from 5.06 μm to 1.57 μm , presenting a decrease of 69 %. The experimental results demonstrate that the proposed auto-gain method can effectively stabilize the signal amplitude of the optical encoder, thereby enhancing effective resolution and nonlinear characteristics.

Acknowledgments. The report was published with no external financial support.

References

1. Measurement technologies for precision positioning / Gao, W. [et al.] // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2015. – V. 64, – P. 773–796.
2. Simulation and experimental investigation about interferometric optical fiber acoustic sensor for sensitivity enhancement / Moradi, H. [et al.] // Measurement. – 2019. – V. 137. – P. 556–561.
3. A review on variable and programmable gain amplifiers and applications / de Deus, Michel. [et al.] // Journal of Integrated Circuits and Systems. – 2022. – V. 17, № 1. – P. 1–12.
4. Homodyne laser vibrometer with detectability of nanoscale vibration and adaptability to reflectivity / Fu H. [et al.] // IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement. – 2019. – V. 69, № 2. – P. 542–548.

UDC 681

ADVANCED SENSOR-BASED SYSTEM FOR SOIL NUTRIENT ANALYSIS AND AI-DRIVEN CROP RECOMMENDATION

Dr Dipak P Patil¹, Tushar Hrishikesh Jaware², Sandip R Sonawane²¹Sandip Institute of Engineering and Management, Nasik, India²R C Patel Institute of Technology, Shirpur, India

Abstract. This research presents an automated soil analysis system integrating NPK sensors with machine learning for precision agriculture. The framework employs Arduino UNO microcontroller and ESP8266 Wi-Fi module to capture real-time nitrogen, phosphorus, and potassium levels from soil samples. Collected data transmits to cloud infrastructure where trained algorithms process nutrient concentrations and generate crop cultivation recommendations. An OLED interface provides immediate feedback to agricultural practitioners. Testing demonstrates reliable nutrient quantification and appropriate crop suggestions compared to traditional laboratory methods. The solution offers advantages including immediate results, reduced operational costs, and simplified operation. This technology supports sustainable farming through optimized resource allocation. Future developments will incorporate meteorological data and additional soil characteristics to enhance predictive capabilities and recommendation precision.

Keywords: soil nutrient, crop management, recommendation system, sensor, AI.

Address for correspondence: Tushar Hrishikesh Jaware., R C Patel Institute of Technology, Shirpur, India
e-mail: tusharjaware@gmail.com

Introduction. Agriculture has been pillar of human civilization for centuries, providing both economic security and sustenance. Today, intensive agricultural practices encounter many challenges like soil erosion, reduction in fertility, wastage of resources, and the augmented pressure of demand for food resulting from population increments. Soil well-being is key to deciding the productivity of the crops, and correct measurement of the nutrients present in the soil is crucial to maintaining sustainable farming.

Traditional methods of soil testing are time-consuming, slow-paced, and usually inaccessible to small farmers. Traditional methods also have results inconsistencies, leading to suboptimal agricultural choices. Recent technological advancements, especially in Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and Cloud Computing, have opened the way for automated, real-time soil analysis systems with precision and efficiency.

This paper introduces an AI-based Soil Nutrient Analysis and Crop Recommendation System using NPK sensors, cloud computing, and machine learning algorithms to offer precise soil health analysis. By combining these cutting-edge technologies, the system facilitates data-driven farmers' decision-making, improves nutrient management, and increases agricultural productivity. Proposed approach improves agricultural productivity and promotes sustainable agriculture by minimizing excessive fertilizer application and minimizing impact on environment. Traditional methods of soil analysis are labor-intensive and not readily available to small farmers. Recent innovations in IoT and AI technologies have made it possible to deploy automated Systems for soil analysis that provide real-time information and valuable insights.

Methodology. Soil Nutrients and Crop Suggestion System is developed upon a well-integrated combination of software and hardware components to ensure efficient and real-time soil monitoring as indicated in fig. 1. The system is designed with the methodology that catches the level of soil nutrients accurately, processes data

effectively, and offers actionable advice to farmers. System utilizes sensor technology, microcontrollers, wireless communication, and machine learning algorithms to ensure high-precision output. The implementation is split into hardware and software modules, each having a vital contribution to data gathering, processing, and decision-making.

The hardware realization of this crop advising and soil examination system is built on a secure infrastructure for collecting real-time soil data. Its core is the use of an NPK Sensor (LNPK-101) as shown in figure 2, which measures precisely the Nitrogen, Phosphorus, and Potassium concentrations in the soil, giving us vital nutrient information. A sensor data-collecting and processing Arduino UNO acts as its basic processing platform. The ESP8266 Wi-Fi Module facilitates seamless wireless communication, enabling real-time data transfer to a cloud-based storage system, ensuring data accessibility and security. For immediate on-site feedback, an OLED display provides visualization of the soil parameters, allowing farmers to monitor nutrient levels instantly. Complementing the hardware, the software and data processing module is designed to analyze collected data and generate meaningful insights. A machine learning model, which has been trained on a complete dataset of soil compositions and their respective crop yields, is a predictive algorithm that suggests appropriate crops based on real-time soil data. Cloud storage provides data security, accessibility, and ease of retrieval, enabling farmers to monitor soil health trends over time. The data of the farmers can be inputted into the soil data and receive crop recommendations based on current analytics through an interactive interface provided by a web application based on Flask. Integrating these software and hardware components, the system provides an overall, automated, and highly accurate soil analysis and crop recommendation platform, enabling the farmers to optimize agricultural yield and make informed decisions.

Model Training. The recommendation engine utilizes a Random Forest classification algorithm trained on 5,000 soil-crop correlation records. Feature

engineering incorporates nutrient ratios and deficiency indicators alongside absolute concentration values. The training dataset encompasses fifteen common crop varieties including cereals, legumes, and vegetables. Cross-validation techniques employing 80–20 train-test splits ensure model generalization. Hyperparameter optimization achieved optimal performance with 100 decision trees and maximum depth of 15 levels.

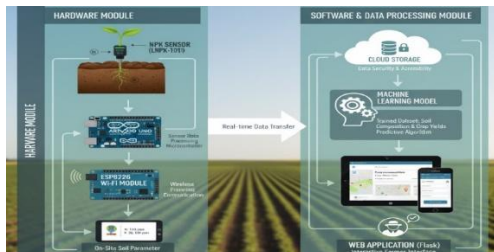


Figure 1 – Schematic of Recommendation system

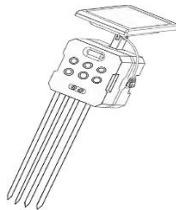


Figure 2 – Soil Nutrient Analysis Sensor

Results and Discussion. Performance evaluation conducted across varied soil types revealed consistent accuracy metrics. Nitrogen detection achieved 93 % correlation with laboratory analysis, phosphorus measurements demonstrated 91 % accuracy, and potassium readings maintained 94 % precision. Response time from soil insertion to cloud data availability averaged 8 seconds under optimal network conditions. The system

successfully operated across temperature ranges of 10–45 °C and humidity levels up to 85 %. Power consumption analysis indicated 72-hour continuous operation capability using standard battery configurations. Cost analysis estimates total hardware investment at approximately one-tenth the expense of traditional testing equipment, making widespread adoption economically feasible for small-scale farmers. Table 1 provides comparative analysis of proposed method with traditional system.

Table 1 – Comparative Analysis

	Proposed System	Traditional Method
Analysis Time	8–10 sec	7–14 days
Cost per Test	Minimal	\$15–30
Technical Expertise	Basic	Lab Skills
Data Accessibility	Cloud based	Physical Report
Recommendation	Automated	Manual

Conclusion and Future Scope. The combination of IoT, cloud computing, and AI in soil nutrient analysis presents an effective solution for precision agriculture. The system suggested is an improvement of crop selection efficiency, reduction of fertilizer misuse, and sustainable agriculture promotion. The improvements planned for the future are adding more data to the dataset for considering soil pH and moisture levels, adding weather prediction models for changing crop suggestions in real-time.

References

1. Zhang, Q. Precision Agriculture Technology for Crop Farming / Q. Zhang. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 366 p.
2. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies / A. Goap [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 155. – P. 41–49.
3. Grell, M. Determining and Predicting Soil Chemistry with a Point-of-Use Sensor Toolkit and Machine Learning Model / M. Grell [et al.] // bioRxiv. – 2020. – P. 1–25.

UDC 681

INTELLIGENT WEARABLE TECHNOLOGY FOR REAL-TIME INFANT VITAL SIGN MONITORING: AN IOT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE FRAMEWORK

Tushar H. Jaware¹, Dipak P. Patil²

¹R C Patel Institute of Technology, Shirpur, India

²Sandip Institute of Engineering and Management, Nasik, India

Abstract. Neonatal mortality claims 2.8 million lives annually within 28 days of birth. This research presents an intelligent wearable wristband using IoT-AI for continuous neonatal monitoring. Device tracks heart rate, oxygen saturation, temperature, and respiratory patterns through miniaturized sensors. Machine learning algorithms detect anomalous vital signs, achieving 94.7 % accuracy in identifying critical health deviations. Each infant receives unique digital identification enabling secure, cloud-based data access across platforms. System employs AES-256 encryption and HIPAA-compliant protocols ensuring data security. This innovation transforms neonatal care from reactive to predictive, enabling timely interventions and potentially reducing preventable deaths through early detection of health complications.

Keywords: neonatal monitoring, IoT, Machine learning healthcare, Predictive vital signs, Early warning system.

Address for correspondence: Tushar Hrishikesh Jaware, R C Patel Institute of Tehnology, Shirpur, India
e-mail: tusharjaware@gmail.com

Introduction. Neonatal health surveillance represents one of healthcare's most demanding challenges due to the physiological fragility and communication limitations inherent to early infancy. Statistical data

from global health organizations reveals that 47 % of under-five mortality occurs within the initial month following birth, with the majority of these deaths being preventable through early detection and

appropriate medical intervention. Traditional monitoring approaches rely on intermittent clinical assessments conducted at scheduled intervals, creating temporal gaps during which critical physiological changes may progress undetected.

The biological characteristics of neonates present unique monitoring requirements. Vital sign parameters exhibit different normal ranges compared to older pediatric populations, necessitating age-specific reference standards. Rapid physiological transitions occurring during neonatal adaptation to extra uterine life demand continuous observation rather than periodic sampling. Furthermore, the delicate nature of neonatal skin and limited tolerance for invasive procedures constrains the applicable monitoring technologies.

Recent advances in microelectronics, wireless communication protocols, and computational intelligence have created opportunities for developing sophisticated yet practical wearable health monitoring solutions. Internet of Things architecture enables seamless integration between sensing devices, data transmission networks, cloud computing infrastructure, and user interface applications. Artificial intelligence methodologies provide capabilities for pattern recognition, anomaly detection, and predictive modeling that surpass traditional threshold-based alarm systems.

This research addresses the critical need for continuous, accurate, and non-invasive neonatal health monitoring through an integrated IoT-AI wearable system. The proposed solution aims to bridge the monitoring gap between clinical facilities and home environments, extend surveillance capabilities beyond hospital discharge, and empower healthcare professionals with actionable intelligence derived from continuous physiological data streams.

System Architecture and Design. The wearable device features a modular sensor array within a medical-grade silicone wristband designed for neonatal comfort and safety. A photoplethysmography sensor utilizes dual-wavelength optical technology at 660 nm and 940 nm to measure heart rate and blood oxygen levels, with specialized algorithms minimizing motion artifacts and ambient light interference. An integrated digital temperature sensor provides precise skin temperature readings with ± 0.1 °C accuracy, positioned to correlate

with core body temperature. A three-axis accelerometer tracks infant movement patterns, supporting both motion artifact correction and behavioral monitoring. The system operates on a low-power ARM Cortex-M4 microcontroller running at 48MHz, managing data acquisition and processing efficiently. An ESP32 module enables dual-band Wi-Fi and Bluetooth 5.0 connectivity for flexible network integration. A compact 150mAh lithium-polymer battery with intelligent power management delivers 48–72 hours of continuous operation, featuring wireless charging to maintain device water resistance and eliminate exposed connectors.

Figure 1 represents the System Architecture of Infant Vital Sign Monitoring.

Validation Study Results. Preliminary validation studies were conducted across clinical and home settings involving 50 neonates with gestational ages ranging from 34 to 40 weeks and chronological ages between 0 and 28 days. Each infant was monitored simultaneously using both the proposed wearable system and standard hospital-grade reference equipment to assess measurement accuracy and system performance.

These results indicated in table 1–3 shows the system performance on terms of accuracy, system alters and reliability.

Table 1 – Measurement Accuracy

Parameter	Mean Absolute Error	Additional Metrics
Heart Rate	2.1 bpm	95 % CI: 1.8–2.4 bpm
Oxygen Saturation	1.3 %	$r = 0.94$, $p < 0.001$
Body Temperature	0.15 °C	± 0.1 °C sensor accuracy

Table 2 – Alert System Performance

Alert Classification	Count	Performance Metric
True Positives (Clinically Significant)	224	94.5 % Positive Predictive Value
False Alarms	13	5.5 % False Positive Rate
Critical Events Detected	8/8	100 % Sensitivity
Average Early Detection Time	8.3 min	Before clinical staff recognition

Table 3 – System reliability

Reliability Metric	Performance
Device Uptime	98.5 %
Data Transmission Packet Loss	<0.2 %
Battery Life (Normal Use)	60 hours

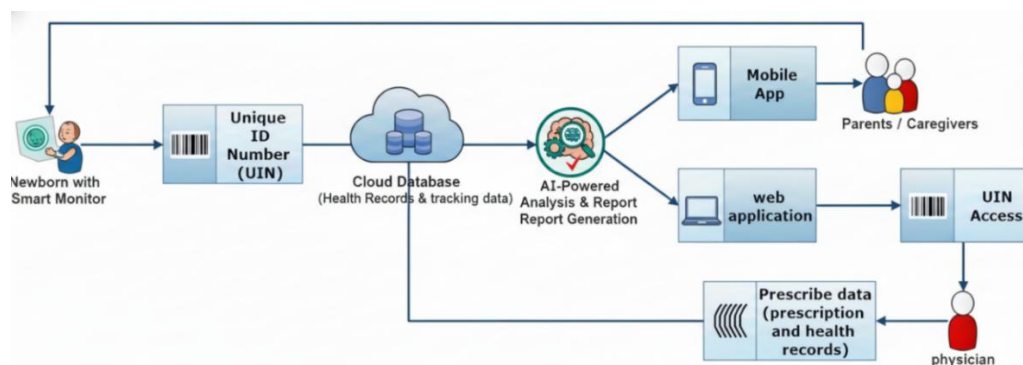


Figure 1 – System Architecture of Infant Vital Sign Monitoring

Conclusion. This research demonstrates the technical feasibility and clinical potential of an integrated IoT-AI wearable system for continuous neonatal health monitoring. The combination of miniaturized sensing technology, wireless connectivity, cloud computing infrastructure, and machine learning analytics creates a comprehensive platform addressing critical gaps in current neonatal care approaches. Validation results confirm accurate physiological measurement, effective anomaly detection, and positive acceptance among both healthcare providers and families.

References

1. World Health Organization. New-born Mortality: Global Health Observatory Data / WHO. – Geneva: WHO Press, 2023. – 67 p.
2. Johnson, K. L. Wearable Technology in Healthcare: Current Applications and Future Directions / K. L. Johnson, M. J. Parker // Journal of Medical Systems. – 2023. – Vol. 47, № 3. – P. 145–162.
3. Chen, W. Artificial Intelligence Applications in Neonatal Intensive Care: A Systematic Review / W. Chen [et al.] // Pediatrics Research. – 2021. – Vol. 89, № 4. – P. 892–903.
4. Patel, M. S. Wearable Devices as Facilitators, Not Drivers, of Health Behavior Change / M. S. Patel, D. A. Asch, K. G. Volpp // JAMA. – 2015. – Vol. 313, № 5. – P. 459–460.
5. Bonafide, C. P. Development and Validation of an Algorithm to Predict Physiologic Monitor Alarms / C. P. Bonafide, A. R. Localio, K. E. Roberts // Pediatrics. – 2018. – Vol. 142, № 1. – Art. e20173152.
6. Zhu, T. Bayesian Network Model for Prediction of Adverse Events in Neonates / T. Zhu, P. J. Watkinson, D. A. Clifton // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. – 2020. – Vol. 24, № 9. – P. 2698–2707.

УДК 538.9; 538.083

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОМ

Комарова Е. Г.¹, Акимова Е. Б.¹, Жарин А. Л.², Шаркеев Ю. П.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние импульсного и непрерывного ультразвука (УЗ) при микродуговом оксидировании (МДО) на электростатический потенциал поверхности сформированных кальций-фосфатных (КФ) покрытий. В процессе МДО в анодном режиме в электролите на основе гидроксиапатита формируются пористые КФ покрытия с шероховатой поверхностью, несущей отрицательный заряд. Приложение УЗ при МДО приводит к увеличению гетерогенности поверхности покрытий, уменьшению пористости и увеличению отрицательного электростатического потенциала от –85 до –131 мВ.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, ультразвук, кальций-фосфатное покрытие, электростатический потенциал поверхности.

ELECTROSTATIC POTENTIAL OF CALCIUM PHOSPHATE COATINGS FORMED BY ULTRASOUND-ASSISTED MICRO-ARC OXIDATION

Komarova E. G.¹, Akimova E. B.¹, Zharin A. L.², Sharkeev Yu. P.¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

²Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The effect of pulsed and continuous (sinusoidal) ultrasound (US) on the electrostatic potential of calcium phosphate (CaP) coatings formed during microarc oxidation (MAO) has been studied. Porous CaP coatings with a rough surface and an electronegative surface charge are formed in an electrolyte suspension based on hydroxyapatite during the MAO process. Using US during MAO increases the heterogeneity of the coating surface and decreases porosity, resulting in an increase in the negative electrostatic potential from –85 to –131 mV.

Keywords: microarc oxidation, ultrasound, calcium phosphate coating, surface electrostatic potential.

Адрес для переписки: Комарова Е. Г., пр. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

e-mail: katerina@ispms.ru

Введение. Объемно-пористые кальций-фосфатные (КФ) покрытия на титановых имплантатах являются успешными материалами для применения в ортопедии, поскольку их химический состав и морфология способны имитировать естественную костную ткань. Применение метода МДО с приложенным в электролит УЗ для формирования на поверхности титана КФ покрытий позволяет получать покрытия с широким спектром физико-химических и биологических свойств за счет варьирования режимов нанесения покрытия. Целью данной работы было изучение влияния

формы УЗ волны в процессе МДО на электрические свойства КФ покрытий.

Материалы и методы. КФ покрытия наносили на поверхность пластин из технически чистого титана марки ВТ1-0 размером 10 × 10 × 1 мм. Нанесение КФ покрытий проводили методом МДО с УЗ на установке «Micro-Arc 3.0» (ИФПМ СО РАН, г. Томск, Россия), схема которой представлена на рисунке 1. Установка состоит из источника питания импульсного тока, гальванической водохлаждаемой ванны из титана (катод) с УЗ

излучателями, держателя образцов из титана (анод) и ПК. Покрытия наносили в электролите-суспензии, содержащем гидроксиапатит, карбонат кальция и оаствор оротфосфорной кислоты в дистиллированной воде, в течение 10 мин при анодном напряжении 200 В, частоте и длительности импульсов соответственно 50 Гц и 100 мкс [1]. В процессе нанесения покрытия в ванну с электролитом подавалось УЗ поле или с импульсной волной мощностью 35 Вт, или с непрерывной синусоидальной волной мощностью 100 Вт при частоте УЗ волн 35 кГц. Было получено три группы образцов: (1) МДО – контрольные КФ покрытия, нанесенные без УЗ; (2) МДО/ИУЗ – КФ покрытия, нанесенные с импульсным УЗ; (3) МДО/НУЗ – КФ покрытия, нанесенные с непрерывным УЗ.

Электростатический потенциал (ЭП) поверхности покрытий и его пространственное распределение по площади образца проводили с помощью цифрового метода измерения контактной разности потенциалов на экспериментальной установке Scan2019 с цифровым зондовым электрометром (БНТУ, г. Минск, Беларусь) [2, 3]. Растровое сканирование ЭП проводили сферическим зондом диаметром 500 мкм и шагом сканирования 200 мкм.

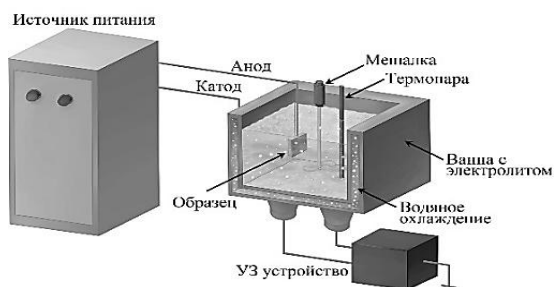


Рисунок 1 – Схема установки МДО с УЗ

Результаты. Исследования методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), выполненные на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss LEO EVO 50 (ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН) показали, что морфология поверхности МДО покрытий представлена структурными элементами – сферами и полусферами с внутренними порами, и порами между сферами. Приложение УЗ в процессе МДО (МДО/ИУЗ и МДО/НУЗ покрытия) приводит к увеличению гетерогенности поверхности покрытий за счет локального разрушения сфер и полусфер и появления областей деструкции, содержащих полуразрушенные сферы, осколки и частицы, в результате чего поверхностная пористость уменьшается (рисунок 2).

Результаты измерения интегральной величины ЭП и его пространственного распределения по площади образцов представлны в таблице 1 и на рисунке 3. Установлено, что все покрытия обладают отрицательным ЭП, который варьируется от –85 до –131 мВ. Это указывает на то, что сформированные покрытия являются электретными (поляризованными) диэлектриками. При этом, контрольные

МДО покрытия характеризуются наименьшим отрицательным ЭП, тогда как МДО/НУЗ покрытия – наибольшим отрицательным ЭП. Для всех групп покрытий обнаружено, что ЭП распределен достаточно однородно по всей площади образца (рисунок 3). Наиболее значимые флуктуации или различия в величине ЭП наблюдаются на краях образцов, где ЭП имеет наибольшие отрицательные значения. Авторы связывает это явление со «стеканием» электрического заряда к периферийным (краевым) областям образцов при их электрической поляризации в процессе осаждения покрытий.

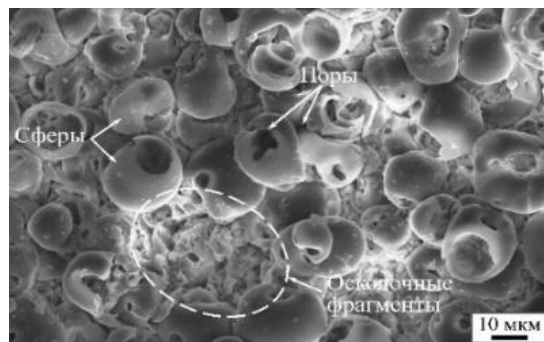


Рисунок 2 – РЭМ-изображение поверхности МДО/НУЗ покрытия

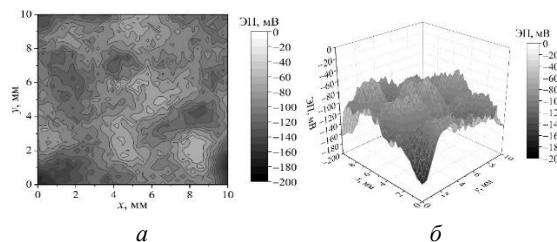


Рисунок 3 – 2D (а) и 3D (б) распределения ЭП на поверхности образца МДО/НУЗ

При пропускании УЗ волн в процессе МДО в объеме электролита интенсифицируется процесс массопереноса электроактивных ионов и частиц на поверхности электрода (подложки), тем самым создавая дополнительные электрические поля [3]. В результате этого наблюдается увеличение поляризации электрического заряда в поверхностной области покрытия и, как следствие, происходит повышение величины отрицательного ЭП МДО/ИУЗ и МДО/НУЗ покрытий по сравнению с контрольными МДО покрытиями.

Таблица 1 – ЭП поверхности покрытий

Образец	МДО	МДО/ИУЗ	МДО/НУЗ
ЭП, мВ	-85 ± 22	-118 ± 15	-131 ± 17

Закключение. Установлено, что приложение импульсного или непрерывного синусоидального УЗ в процессе МДО приводит к увеличению гетерогенности поверхности покрытий, уменьшению пористости и увеличению отрицательного электростатического потенциала от –85 до –131 мВ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках г/з ИФПМ СО РАН, проект № FWRW-2021-0007.

Литература

1. Kazantseva, E. A. Microstructure and elemental composition of UMAO calcium phosphate coatings / E. A. Kazantseva, E. G. Komarova // Structural Integrity Procedia. – 2022. – Vol. 40. – P. 207–213.
2. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин /

А. Л. Жарин [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

3. Effect of ultrasonic power applied to micro-arc oxidation on the morphology, chemistry, wettability and electrical properties of calcium phosphate coatings on titanium / E. G. Komarova [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 109. – Art. 183056.

УДК 538.911, 539.25

ТЕХНОЛОГИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКЕ

Комаров Ф. Ф.¹, Власукова Л. А.², Мильчанин О. В.¹, Пархоменко И. Н.², Харлович Ю. В.¹, Романов И. А.², Вендлер Э.³, Жук Е.⁴

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Университет имени Фридриха Шиллера, Йена, Германия

⁴Университет имени Марии Склодовской-Кюри, Люблин, Польша

Аннотация. В работе рассмотрены результаты исследований по созданию светоизлучающих и фотоприемных приборов УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазонов ячеек фотоуправляемой мемристорной памяти на кремнии и по кремниевой технологии.

Ключевые слова: светодиоды, фотодетекторы ИК-диапазона, мемристорная память.

ION IMPLANTATION TECHNOLOGY IN SILICON PHOTONICS

Komarov F. F.¹, Vlasukova L. A.², Milchanin O. V.¹, Parkhomenko I. N.², Kharlovich Y. V.¹, Romanov I. A.², Wendler E.³, Żuk J.⁴

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

³Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany

⁴Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland

Abstract. This work presents an overview of research focused on silicon technology for creating optoelectronic devices – such as light emitters and photodetectors for the UV, visible, and near-infrared ranges – and optically-controlled memristor memory cells.

Keywords: light-emitting diodes, infrared photodetectors, memristive memory.

Адрес для переписки: Комаров Ф. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: komarovf@bsu.by

Кремний является основным полупроводниковым материалом, используемым для производства интегральных микросхем, и занимает доминирующее положение на рынке с долей около 90 %. В настоящий момент вклад межсоединений в общее время задержки на логических элементах сопоставим или даже превышает время переключения транзисторов. Наиболее многообещающим решением проблемы увеличения быстродействия буферных интегральных схем является оптическая передача данных внутри Si кристалла. Оптические межсоединения обеспечивают скорость передачи данных ~ 30–60 Гбит/с, предел медной технологии оценивается в 20 Гбит/с. Фундаментальной проблемой, однако, является то, что кремний – непрямозонный полупроводник и, вследствие этого, имеет низкую квантовую эффективность межзонной излучательной рекомбинации. В последние годы специалисты в области микро- и оптоэлектроники усиленно работают над разработкой высокоэффективных излучателей в ближней-, средней-ИК и видимой области,

волноводов, модуляторов и приемников излучения на кремнии, создание которых позволило бы объединить электронные и оптические приборы в единой интегральной схеме.

Для создания светоизлучающей структуры на основе кремния в ИК области, а именно в области так называемых окон прозрачности стандартного оптического волокна (1,3 мкм и 1,5 мкм), разрабатывается несколько подходов. Интересный подход, разработанный нами и рядом других лабораторий мира, к решению проблемы создания источника ИК излучения, основан на создании нанокристаллов прямозонных, узкозонных полупроводников A^3B^5 (InAs, InSb, GaSb) в матрице кремния [1–3]. В этом случае спектральным положением длины волны излучения и интенсивностью свечения можно управлять путем изменения размеров и плотности распределения нанокристаллов. Эффективным способом создания массивов квантовых точек узкозонных полупроводников A^3B^5 в матрице кристаллического кремния является метод ионной имплантации с последующим отжигом. Данный метод полностью

совместим с промышленной технологией микроэлектроники.

Основой для создания люминесцентных соединений УФ и видимого диапазона выступают различные вещества, однако наиболее перспективными являются структуры A^2B^6 . Большинство полупроводников A^2B^6 являются прямозонными, что усиливает их люминесцентные свойства и расширяет область применения. Сочетание высокой вероятности излучательных переходов в диапазоне длин волн от 320 до 830 нм и высокой подвижности носителей заряда позволяет использовать прямозонные полупроводники A^2B^6 (в том числе например, ZnO, ZnSe, ZnS) [4–6] для получения источников и приемников излучения в видимом и УФ диапазоне, для создания светодиодов на квантовых точках, солнечных элементов, а также для изготовления элементов различных оптических приборов и устройств, применяемых в биологии, военной сфере и медицине.

Особого внимания заслуживают уже созданные нами структуры типа Zn-ядро/ZnO-оболочка в SiO_2 , которые представляют интерес из-за гетеропереходов на границе раздела Zn/ZnO [4]. Такая особенность наноструктур типа Zn-ядро/ZnO-оболочка повышает их квантовую эффективность по сравнению с ZnO нанокластерами или тонкими пленками этого соединения, и делает их перспективными для создания синих и белых светодиодов, для применения в дисплеях на квантовых точках (QLED), для создания флуоресцентных меток и ряда других оптоэлектронных применений.

Для синтеза наноструктур на основе соединений A^2B^6 используем ионную имплантацию с последующими термообработками. Преимуществом этого метода является полная совместимость с современной кремниевой технологией.

Реализация оптоэлектронной пары (излучатель – приемник) требует также создания эффективного широкополосного кремниевоего фотоприемника. В интегрированных приборах кремниевой фотоники детекторы должны обладать способностью регистрировать фотоны с энергией меньше, чем ширина запрещенной зоны (E_g) Si (1,12 эВ или с длиной волны более, чем 1,1 мкм), которые могут эффективно распространяться с минимумом потерь внутри оптоволоконна или иных волноводных сред. Кремниевые фотодетекторы нечувствительны к трем основным полосам оптоволоконных телекоммуникационных систем: S (1460–1530) нм, C (1530–1565) нм и L (1565–1625) нм.

Нами [7–9] и в ряде ведущих лабораторий мира микро- и оптоэлектронного профиля проводится разработка и исследование фотоприемников на принципах создания примесных подзон в запрещенной зоне Si путем введения примесей, создающих глубокие уровни (Se, Te, S). Как показано, такие фотоприемники ближнего и среднего ИК-диапазонов способны эффективно работать при комнатных температурах.

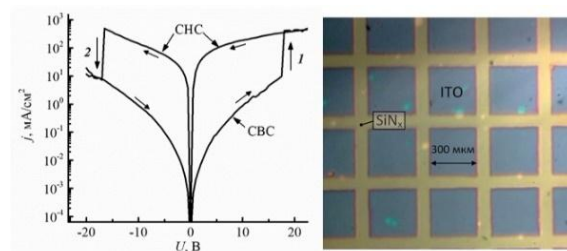


Рисунок 1 – Вольт-амперные характеристики и топология структуры ITO/SiNx/Si-p. Стрелками показан цикл переключения

В качестве функциональных слоев ячеек мемристорной памяти использованы слои SiN_x и структуры SiO_2/SiN_x [10, 11], обладающие высокой фоточувствительностью. Переключение ячеек памяти обеспечивается как импульсом электрического тока, так и оптической подсветкой.

Литература

1. Ion-beam synthesis of InAs nanocrystals in crystalline silicon / F. F. Komarov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – Vol. 266, № 16. – P. 3557–3564.
2. Structure and optical properties of silicon layers with GaSb nanocrystals created by ion beam synthesis / F. F. Komarov [et al.] // Physica Status Solidi A. – 2012. – Vol. 209, № 1. – P. 148–152.
3. Optical and structural properties of silicon with ion-beam synthesized InSb nanocrystals / F. F. Komarov [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 83, № 6. – P. 959–964.
4. Luminescence of ZnO nanocrystals in silica synthesized by dual (Zn, O) implantation and thermal annealing / I. N. Parkhomenko [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Vol. 54. – Art. 265104.
5. Radiative recombination in zinc blende ZnSe nanocrystals ion-beam synthesized in silica / I. N. Parkhomenko [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 55, № 20. – Art. 205101.
6. Raman monitoring of ZnSe and ZnS_xSe_{1-x} nanocrystals formed in SiO_2 by ion implantation / M. Makhavikou, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2018. – Vol. 435. – P. 3557–3564.
7. Structural and optical properties of Si hyperdoped with Te by ion implantation and pulsed laser annealing / F. F. Komarov [et al.] // Vacuum. – 2020. – Vol. 178. – Art. 109434.
8. Te-hyperdoped silicon layers for visible-to-infrared photodiodes / F. F. Komarov [et al.] // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67, № 15. – P. 2448–2458.
9. Broad infrared absorption band through ion beam hyperdoping of silicon with selenium / F. F. Komarov [et al.] // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 639. – Art. 158168.
10. Resistive Switching Effect of the Structure Based on Silicon Nitride / F. F. Komarov [et al.] // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, № 1. – P. 133–138.
11. Механизмы резистивного переключения в мемристорах на основе слоев нестехиометрического нитрида кремния / И. А. Романов [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 1. – С. 23–31.

УДК 623.1/7

РАЗРАБОТКИ НТЦ «ЛЭМТ» В ОБЛАСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДРОНАМ Шкадаревич А. П.

Научно-производственное унитарное предприятие
«Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены перспективные разработки в области противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Проанализированы физические принципы работы и эффективность современных средств поражения. Основное внимание уделено комплексу кинетического перехвата с использованием дронов-перехватчиков и шрапнельных зарядов, а также энергетическим системам – лазерному и электромагнитному оружию. Определены ключевые преимущества, ограничения и потенциальные направления интеграции рассмотренных технологий в единые контуры противодроновой обороны.

Ключевые слова: Противодействие БПЛА, лазерное оружие, электромагнитное оружие, дрон-перехватчик, шрапнельный заряд.

DEVELOPMENTS OF STC «LEMT» IN THE FIELD OF COUNTER-DRONE TECHNOLOGY Shkadarevich A.P.

The Scientific and Production Unitary Enterprise
“Scientific and Technical Center «LEMT» of BelOMO”, Minsk, Belarus

Abstract. The article reviews promising developments in the field of countering unmanned aerial vehicles (UAVs). It analyzes the physical principles of operation and the effectiveness of modern defeat means. The primary focus is on kinetic interception systems utilizing interceptor drones and shrapnel charges, as well as directed-energy systems—laser and electromagnetic weapons. The key advantages, limitations, and potential directions for integrating the considered technologies into unified counter-UAV defense circuits are identified.

Keywords: Counter-UAV, laser weapon, electromagnetic weapon, interceptor drone, shrapnel charge.

Адрес для переписки: Шкадаревич А. П., ул. Макаенко, 23/1, г. Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: office@lemt.by

Беспилотные летательные аппараты (дроны) резко ворвались в различные сферы человеческой деятельности, а опыт боевых действий СВО указывает, что они не только меняют их облик, но и существенно влияют на национальную безопасность любой страны. Естественно, что это потребовало быстрого реагирования на данные угрозы и серьезных усилий ученых, разработчиков и во-

енных. На рисунке 1 схематично показаны современные подходы к решению данной актуальной проблемы.

НТЦ «ЛЭМТ», опираясь на свой более чем 30-летний опыт в области лазерных и оптико-электронных технологий, использует в своих разработках практически все вышеперечисленные технологии.



Рисунок 1 – Схема противодействия БПЛА

В части систем обнаружения разработаны радиолокационно-оптические всепогодные, всепогодные комплексы «Зорки» (рисунок 2) включающие радары X-диапазона, а также многоспектральные лазерно-оптические системы, которая позволяет обнаруживать и распознавать цели с размерами

$< 0,01 \text{ м}^2$ на расстоянии не менее 5 км. По требованию заказчиков комплексы «Зорки» могут комплектоваться модулем акустической и радиоразведки белорусских партнеров.

В части обезвреживания БПЛА НТЦ «ЛЭМТ» специализируется на жестком уничтожении дронов.

Так, созданы и проходят натуральные испытания лазерные комплексы «Феникс» и «Шафран» (рисунок 3) мощностью соответственно 5 и 10 кВт.



Рисунок 2 – Комплекс «Зорки»



Рисунок 3 – Комплекс «Шафран»

Совместно с ОАО «ЦНИРТ» разработан и передан заказчику комплекс микроволнового оружия «СПАРК-X8» (рисунок 4). В части кинетического уничтожения созданы экспериментальные образцы на основе антидронов с головками самонаведения (рисунок 5) и шрапнельных зарядов (рисунок 6). Проходят лабораторные испытания системы на основе повреждения видео камер (дазлеры).



Рисунок 4 – Изделие «СПАРК-X»



Рисунок 5 – Изделие «Антидрон-ружье»



Рисунок 6 – Изделие «Праща»

Первый опыт использования этих методов и комплексов в реальных условиях указывает, что ни один из них не обеспечивает 100 % защиту и наиболее эффективными являются комбинированное использование подобных систем.

УДК 538.913

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ PZT Филимонов А. В.¹, Вахрушев С. Б.², Королева Е. Ю.², Бронвалд Ю. А.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Было выявлено влияние электрического поля на фазовые переходы в монокристаллах твердых растворов PZT. Обнаружено, что при охлаждении в полях выше порогового фазовый переход из промежуточной в антисегнетоэлектрическую (АСЭ) фазу происходит в три стадии. Выявлены условия формирования упорядоченной системы АСЭ доменов.

Ключевые слова: антисегнетоэлектрики, фазовые переходы, антифазные домены, доменные границы.

ELECTRIC FIELD INFLUENCE ON PHASE TRANSITIONS IN PZT SOLID SOLUTIONS Filimonov A. V.¹, Vakhrushev S. B.², Koroleva E. Yu.², Bronvald Yu. A.²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

²Ioffe Institute
St.-Petersburg, Russia

Abstract. The influence of electric fields on phase transitions in single crystals of PZT solid solutions was revealed. It was found that upon cooling in fields above the threshold, the phase transition from the intermediate to the antiferroelectric (AFE) phase occurs in three stages. The conditions for the formation of an ordered system of AFE domains were identified.

Keywords: antiferroelectrics, phase transitions, antiphase domains, domain boundaries

Адрес для переписки: Филимонов А. В., Политехническая ул. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
e-mail: filimonov@rphf.spbstu.ru

Введение. Антисегнетоэлектрики, в частности, цирконат свинца и твердые растворы на его основе (цирконат-титанат свинца) (PZT, $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) с малым содержанием титаната свинца являются самыми известными антисегнетоэлектриками, и представляют интерес при создании быстрых устройств хранения электрической энергии конденсаторного типа и систем охлаждения электрокалорического типа [1]. Недавно было экспериментально продемонстрировано существование так называемых антифазных доменных границ (АДГ) в чистом цирконате свинца [2]. АДГ в антисегнетоэлектрике представляют собой плоские доменные стенки шириной несколько нанометров, имеющие ненулевую поляризацию. Эти объекты представляют принципиальный интерес, как основа для энергонезависимых запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации. В представляемом докладе рассмотрено влияние электрических полей на фазовые переходы в PZT и возможность управления доменной структурой антисегнетоэлектрической фазы. Представлены как ранее опубликованные [3], так и новые результаты.

Результаты. Для анализа температурной эволюции структуры на различных иерархических уровнях были использованы дифракция и диффузное рассеяние синхротронного излучения. Были исследованы монокристаллы PZT с $x = 0,011; 0,022; 0,024; 0,04$. Электрическое поле прикладывалось вдоль длинной оси, направленной вдоль направления $[110]$ (в кубической системе координат). Измерения рентгеновской дифракции проводились на дифрактометре Supernova.

Фазовый переход в антисегнетоэлектрическую (АСЭ) фазу в твердых растворах PZT с $x \leq 0,06$ происходит через промежуточную квазиромбоэдрическую фазу (ПФ). В этой фазе возникают сверхструктурные (СС) отражения типа $(h + 1/2 k + 1/2 l)$ (М-сверхструктура). В АСЭ фазе формируется Σ -сверхструктурные отражения $(h + 1/4 k + 1/4 l)$, измерение температурных зависимостей интенсивностей сверхструктурных отражений позволяет проследить за возникновением и исчезновением АСЭ и ПФ.

Влияние электрического поля на температуры фазовых переходов было выявлено для PZT1.8, PZT2.2 и PZT2.4.

При охлаждении в полях больше 1 кВ/см на температурных зависимостях интенсивности сверхструктурных отражений М- и Σ - типов возникают две или три ступеньки, которые могут быть соотнесены к фазовым переходам в сегнетоэлектрических доменах с поляризацией

различным образом ориентированной по отношению к приложенному электрическому полю, т.е. происходит расщепление ФП СЭ/АСЭ на три перехода при температурах T_1 , T_2 и T_3 ($T_1 > T_2 > T_3$).

АСЭ параметр порядка может быть соотнесен с одним из двенадцати волновых векторов $q\text{АСЭ} = \{1/4, 1/4, 0\}$. Измерения, проведенные на ряде монокристаллов PZT в АСЭ фазе показали, что охлаждение отожженного в парафазе кристалла приводит к приблизительно одинаковой заселенности различных доменных состояний. На рисунке 1 представлен срез обратного пространства кристалла PZT2.4 плоскостью H0L при температуре 300К. На вставке показана картина рассеяния вокруг узла (00-2). видно, что интенсивности отражений α , β , γ и δ примерно равны. На рисунке 1 также хорошо видны узкие линии, проходящие через АСЭ сверхструктурные отражения. Эти линии могут быть соотнесены с АДГ. ДР в окрестности различных сверхструктурных отражений Σ -типа, имеет практически равную интенсивность, что указывает на равную концентрацию АДГ различной ориентации. Анализ формы линии ДР позволяют оценить размеры АДГ, которые $\approx 4 \times 40 \times 40$ nm.

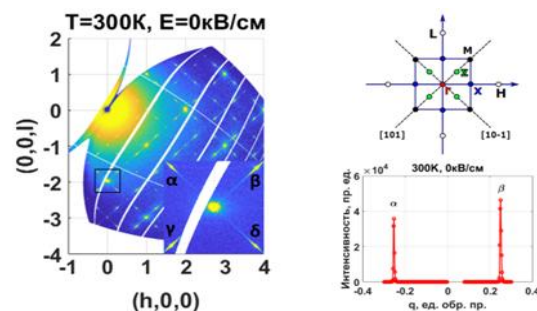


Рисунок 1 – Срез обратного пространства PZT2.4, плоскостью H0L, при температуре 300К, в АСЭ фазе в отсутствии электрического поля (слева), одномерное сечение обратного пространства параллельное оси H, через сверхструктурные отражения Σ -типа $(0,25\ 0\ -2,75)$ и $(-0,25\ 0\ -1,75)$

Охлаждение в электрическом поле влияет на заселенность различных доменных состояний и позволяет создать систему ориентированных АСЭ доменов и антифазных доменных стенок. На рисунке 2 представлен срез обратного пространства кристалла PZT2.4 плоскостью H0L при температуре 300 К, полученный при охлаждении из парафазы в электрическом поле 5 кВ/см. Сравнение интенсивности отражений α и β позволяет сделать вывод о том, что заселенность состояний с вектором антисегнетоэлектричества $\mathbf{A}$ перпендикулярным направлению поля составляет более 80 %.

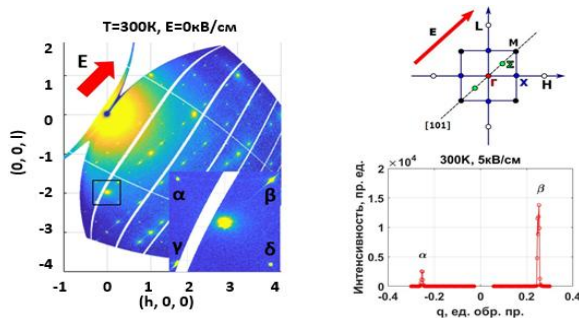


Рисунок 2 – Срез обратного пространства плоскостью H0L, при температуре 300K, в АСЭ фазе в приложенном электрическом поле в направлении $[1\ 0\ 1]$ (слева), одномерное сечение обратного пространства параллельное оси H, через сверхструктурные отражения Σ -типа $(0,25\ 0\ -1,75)$

Заключение. Установлено, что при охлаждении в электрическом поле переход ПФ-АСЭ происходит в три стадии. Показано, что в отсутствии электрического поля возможные АСЭ доменные

состояния формируются примерно с равной вероятностью. Охлаждение в электрическом поле приводит к преимущественному сохранению одного доменного состояния с волновым вектором, параллельным полю, и антисегнетоэлектрическим вектором $\mathbf{A}$, перпендикулярным полю.

Определены размеры АДГ. При охлаждении в электрическом поле, наряду с формированием упорядоченной системы АСЭ доменов, возникает также система ориентированных доменных границ.

Литература

1. Antiferroelectric thin-film capacitors with high energy-storage densities, low energy losses, and fast discharge times / Ch. W. Ahn [и др.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2015. – Vol. 7, № 48. – P. 26381–26386.
2. Ferroelectric translational antiphase boundaries in nonpolar materials / X. Wei [и др.] // Nature communications. – 2014. – Vol. 5, № 1. – P. 1–8.
3. Electric field control of antiferroelectric domain pattern / S. B. Vakhruşev [и др.] // Physical Review B. – 2021. – Vol. 103, № 2. – P. 021410.

УДК 520.35

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ВИДЕОКАМЕРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ

Мачихин А. С., Батшев В. И., Золотухина А. А.

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Для своевременной диагностики состояния сельскохозяйственных угодий большой площади необходимо повышение эффективности (информативности, быстродействия, производительности и др.) методов и аппаратно-программных средств дистанционного мониторинга и оценки морфофизиологических характеристик растительности. Их основу зачастую составляют мультиспектральные видеосистемы, позволяющие регистрировать несколько изображений, сформированных излучением различных поддиапазонов спектра. В настоящей работе описано техническое решение для реализации данного подхода, основанное на мультиапертурной оптической системе, формирующей одновременно несколько спектральных изображений на одном широкополосном матричном приемнике излучения. Показано, что такой подход имеет существенные преимущества по сравнению с другими. Описаны существующие и потенциальные сельскохозяйственные применения разработанных мультиспектральных видеокамер.

Ключевые слова: мультиспектральная оптическая система, спектр отражения, цифровая обработка изображений, вегетационные индексы, физиология растений.

MULTI-SPECTRAL IMAGING SYSTEMS FOR REMOTE MONITORING OF THE PHYSIOLOGICAL STATE OF PLANTS

Machikhin A. S., Batshev V. I., Zolotukhina A. A.

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. To timely diagnose the condition of large agricultural areas, it is necessary to improve the efficiency (information content, speed, performance, etc.) of methods, hardware and software for remote monitoring and assessment of vegetation morphophysiological characteristics. These systems are often based on multi-spectral imaging systems that can acquire multiple spectral images. This paper describes a multi-spectral system based on a multi-aperture optical system that simultaneously forms multiple spectral images on a single broadband image sensor. It is shown that this approach offers significant advantages over other solutions. The existing and potential agricultural applications of the developed multispectral imaging systems are described.

Keywords: multi-spectral optical system, reflectance spectrum, digital image processing, vegetation indices, plant physiology.

Адрес для переписки: Мачихин А. С., ул. Бутлерова, 15, г. Москва 117342, Российская Федерация
e-mail: machikhin@ntcup.ru

Разработка и внедрение диагностических методов и средств является одним из наиболее перспективных направлений инновационного технологического развития сельского хозяйства и, в частности, растениеводства [1, 2]. Своевременное определение различных параметров агроценоза позволяет исследовать новые и оптимизировать существующие агротехнологические приемы для повышения урожайности, питательной ценности продукции и экономической эффективности производства, и кроме того, контролировать и даже снижать экологическую нагрузку на окружающую среду.

Дистанционный мониторинг с помощью спектральных приборов является одним из наиболее перспективных методов неразрушающей, надежной и производительной диагностики состояния растительности и почв. Спектрометрия с пространственным разрешением (видеоспектрометрия) обеспечивает качественно более высокий уровень дистанционного мониторинга, так как позволяет проводить единовременный анализ морфологических и спектральных характеристик объекта, повышает наглядность, интерпретацию данных, производительность исследования. Наиболее востребованными для дистанционного мониторинга являются мультиспектральные системы с единовременной регистрацией спектральных изображений, обеспечивающие надежный сбор данных в движении или в ходе быстропротекающих процессов, обладающие высоким пространственным разрешением и достаточным для большинства прикладных и научных задач количеством спектральных каналов, малыми массой и габаритами. Такие системы пригодными для установки на беспилотные летательные аппараты, что резко повышает их производительность мониторинга и расширяет области их применения мультиспектральной съемки [3, 4].

Большинство существующих мутиспектральных систем биологического и сельскохозяйственного назначения имеют следующие недостатки: малое число фиксированных спеткраль-ных каналов, невозможность подстраивать светосилу отдельных спектральных каналов, сложность сборки, калибровки и юстировки и пр.

В НТЦ УП РАН разработан и реализован способ одновременной регистрации мультиспектрального изображения объекта, свободный от этих недостатков. Он заключается в пространственном и спектральном разделении пучка широкополосного излучения с помощью мультиапертурной оптической системы, каждый канал которой формирует узкополосное изображение в заданном спектральном интервале, одновременной регистрации всех спектральных изображений

одним матричным приемником излучения и совместной цифровой обработке полученных изображений [5].

На основе такого подхода разработаны мультиспектральные видеокамеры нескольких типов. Наиболее универсальной из них является 16-канальная система [6], обеспечивающая одновременное получение широкополосного и 15 спектральных (в диапазоне 300-1000 нм с шагом 50 нм) изображений объектов с расстояния от 2 м до ∞ в пределах углового поля $35^\circ \times 35^\circ$ без пространственного или спектрального сканирования. При этом все 15 узкополосных изображений разрешением $500^\circ \times 500$ пикселей оказываются пространственно и спектрально разнесены. Это позволяет обеспечить идентичные угловые поля зрения и одинаково высокое качество изображения в каждом спектральном канале. На рисунке 1 показано главное окно программы для управления параметрами такой мультиспектральной видеокамеры и регистрацией пространственно-спектральных данных с ее помощью. На нем показаны примеры одновременно регистрируемых спектральных изображений листьев, а также спектров яркости и отражения, вычисляемых по этим изображениям и усредненных по выбранной пользователем области.

Для корректных спектральных измерений была разработана процедура предварительной пространственно-спектральной калибровки видеокамеры, заключающаяся в последовательной съемке нескольких эталонных объектов и вычислении корректирующих коэффициентов. После применения процедуры коррекции зарегистрированных пространственно-спектральных данных становится возможным попиксельное сопоставление всех спектральных изображений и корректное определение спектров отражения наблюдаемых объектов в каждом пространственном элементе (пикселе) изображения.

Разработанная компактная оптическая система может стать основой мультиспектральных оптико-электронных систем сельскохозяйственного назначения при решении задач, связанных с необходимостью сбора пространственно-спектральных данных с высокой производительностью как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Применение разработанных методических и инструментальных средств имеет широкие перспективы в части создания и развития качественно новых диагностических методов для технологий прецизионного земледелия, в том числе для повышения эффективности биологической оценки и оптимизации способов определения плодородия почв, корректного прогнозирования

урожайности сельскохозяйственных культур, агроэкологического и фитосанитарного мониторинга агроценозов и пр.

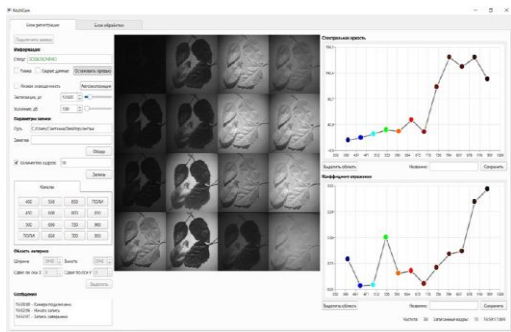


Рисунок 1 – Внешний вид главного окна программы для управления 16-канальной мультиспектральной видеокамерой

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 25-16-00121).

Литература

1. Zhang, Q. Precision Agriculture Technology for Crop Farming / Q. Zhang. – New York: CRC Press, 2015. – 382 p.
2. El-Mesery, H. Applications of non-destructive Technologies for agricultural and food products quality inspection / H. El-Mesery, H. Mao, E. Abomohra // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 4. – Art. 846.
3. Raeva, P. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV / P. Raeva, J. Sedina, A. Dlesk // European Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 52, № 1. – P. 192–201.
4. Zhang, S. A review of the application of UAV multispectral remote sensing technology in precision agriculture / S. Zhang, X. Wang, H. Lin, Y. Dong, Z. Qiang // Smart Agricultural Technology. – 2025. – Vol. 12. – Art. 101406.
5. Пат. 2800054 Рос. Федерация, МПК G01J 5/0801, G01J 3/0294. Способ одновременной регистрации мультиспектральных изображений / А. С. Мачихин, В. И. Батшев, А. В. Крюков. – № 2022101234; заявл. 18.01.2022; опубл. 17.07.2023, Бюл. № 20.
6. Батшев, В. И. Феноменологическая теория микроразличий шарика на пятне контакта / В. И. Батшев, А. В. Крюков, А. С. Мачихин, А. А. Золотухина // Оптический журнал. – 2023. – Т. 90, № 11. – С. 113–123.

УДК 621.382.001

ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ И ПРОБЛЕМАМ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Кernasовский Ю. М.

ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, Беларусь

Аннотация. В материалах представлены некоторые результаты исследований в области создания датчиков теплового потока на основе технологий микроэлектромеханических систем (мэмс). Показано применение датчиков в различных отраслях промышленности и необходимость и перспективность развития технологии МЭМС.

Ключевые слова: датчик теплового потока, МЭМС, термопара, эффект Зеебека, тепловизионный сенсор.

A REVIEW OF DOMESTIC AND INTERNATIONAL RESEARCH ON THE CURRENT STATUS AND PROBLEMS IN THE FIELD OF HEAT FLOW SENSORS

Kernasousky Yu. M.

OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”, Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents some research results on the development of heat flow sensors based on microelectromechanical systems (MEMS) technology. The application of these sensors in various industries and the need for and potential for further development of MEMS technology are discussed.

Keywords: heat flow sensor, MEMS, thermocouple, Seebeck effect, thermal imaging sensor.

Адрес для переписки: Кернасoвский Ю. М., ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», 220024, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Лейтенанта Кижеватова, 86-2
e-mail: mniirm@mniirm.by

Динамика развития современной науки, промышленности и общества вызывает потребность в создании миниатюрных датчиков на основе МЭМС-технологий. Датчики теплового потока (ДТП), созданные по этим технологиям находят широкое применение в космической деятельности, медицине, промышленности, сельском хозяйстве, метрологии, энергетике, связи, строительстве, транспорте, биологии, спорте, военном деле и других областях человеческой деятельности.

С 80-х годов в институте технической теплофизики АН Украинской ССР проводятся исследования в области теплофизических измерений. Созданы и запатентованы ряд датчиков теплового потока [1], которые выпускаются ООО «ДП ЗАВОД РАПИД» г. Чернигов, Украина и «Научно-производственное объединение измерительной техники» г. Москва, Российская Федерация.

Опираясь на созданные в 1980-х годах технологии МЭМС-микрообработки кремния

получили дальнейшее развитие исследования и разработки датчиков теплового потока. Работы выполнялись в Центральной исследовательской лаборатории корпорации Sharp (Япония), Центре физических наук Honeywell (США), техническом университете Берлина (Германия), Делфтском технологическом университете (Нидерланды), Институте микротехнологий университета Невшатель (Швейцария) и ряде других.

С учетом важности работ [2] по МЭМС датчикам появляются обзорные статьи отражающие различные взгляды и подходы в исследованиях.

Активные исследования по этой тематике ведутся в Московском институте электронной техники, Московском авиационном институте, Тульском государственном университете, Физико-техническом институте им. Иоффе г. Санкт-Петербург, в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Государственном научно производственном объединении «Оптика, Оптоэлектроника и Лазерная техника», Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» [3].

В обзоре [4, 5] рассмотрены состояние и перспективы разработок многоэлементных ИК МЭМС-сенсоров с термопарными преобразователями теплового излучения. Проанализированы возможности оптимизации параметров чувствительных термопарных МЭМС-элементов с использованием материалов и процессов КМОП-технологии.

Отмечено, что, особое место среди многоэлементных ИК МЭМС приемников занимают сенсоры с чувствительными элементами на основе микротермопар. Такие элементы включают в себя диэлектрическую мембрану с высоким поглощением тепла и несколько последовательно соединенных микротермопар, «горячие» спаи которых расположены на мембране, а «холодные» – имеют хороший тепловой контакт с подложкой. Считывание возникающего при нагревании мембраны термоэлектрического потенциала (эффект Зеебека) осуществляется КМОП схемами, расположенными непосредственно на кристалле.

Среди коммерчески реализуемых на рынке изделий с многоэлементными термопарными приемниками необходимо отметить тепловизионную камеру с матрицей 48×47 компании OMEGA Engineering, inc. и модули с матрицами НТРА (Heimann Thermopile Array) с количеством элементов 32×31 и 64×62 фирмы Heimann Sensors GMBH.

ДТП, разработанный в ОАО «МИНСКИЙ НИИ РАДИОМАТЕРИАЛОВ», предназначен для измерения тепловых потоков с длиной волны от 0,1 до 14 мкм в диапазоне от 0 до 1500 Вт/м. Особенностью технологии изготовления датчика

является реализация конструкции на базе МЭМС-технологии. Диэлектрическая мембрана сформирована на основе нестехиометрического нитрида кремния с использованием процессов двухсторонней фотолитографии и процессов анизотропного травления кремния [6–8].

Разработанный МЭМС датчик теплового потока на основе эффекта Зеебека с низким энергопотреблением, улучшенными массогабаритными характеристиками и высокими техническими показателями чувствительности $R - (38,6-48,9)$ В/Вт для мощности теплового потока $W - (0-500)$ Вт/м², и $R - (93,9-104,3)$ для мощности теплового потока $W - (500-4000)$ Вт/м², что при минимальном времени отклика равно 0,04 с. В 1,2–2 раза лучше имеющихся аналогов.

Литература

1. Датчик теплового потока: пат. 892239 СССР, МПК G01K 17/08 / Е. А. Максимов, М. В. Страдомский; заявитель Ин-т техн. теплофизики АН УССР. – № 2945952; заявл. 17.07.1980; опубл. 23.12.1981 // Бюл. Гос. ком. СССР по делам изобретений и открытий. – 1981. – № 47.
2. Graf, A. Review of micromachined thermopiles for infrared detection / A. Graf, M. Arndt, M. Sauer // Measurement Science and Technology. – 2007. – Vol. 18, № 7. – P. R59–R75.
3. Конструкция устройства для измерения тепловых потоков на основе микромеханической системы (МЭМС): пат. 73965 РФ, МПК G01K 17/08 / Е. Н. Пяташев [и др.]; заявитель ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. – № 2008102259/22; заявл. 25.01.2008; опубл. 10.06.2008.
4. Термомеханическая чувствительность неохлаждаемого биматериального приемника ИК-диапазона, построенного по технологии микрооптомеханических систем / Р. З. Хафизов [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 4. – С. 52.
5. Хафизов, Р. З. Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термопарными преобразователями теплового излучения / Р. З. Хафизов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. – 2014. – № 2. – С. 196.
6. Таратын, И. А. Широкодиапазонные датчики теплового потока / И. А. Таратын, Ю. М. Кернасовский, С. А. Филатов // Приборостроение-2021: материалы МНТК., Минск, 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2021. – С. 133–134.
7. Разработка конструкции и технология изготовления тестового чувствительного элемента датчика теплового потока на основе эффекта Зеебека / Ю. М. Кернасовский [и др.] // Наноиндустрия. – 2019. – № 5(89). – С. 577–578.
8. Методика и расчет термически обусловленных напряжений в тонких диэлектрических мембранах / И. А. Таратын [и др.] // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 2. – С. 73–78.

СЕКЦИЯ 1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ. СЕНСОРИКА

УДК 615.47: 612.122.1 - 047.36

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ГЛЮКОЗЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ ЧЕЛОВЕКА (КАПИЛЛЯРНАЯ КРОВЬ, МЕЖКЛЕТОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ)

Алексеев И. А.¹, Кудина А. В.¹, Габец В. Л.², Алексеев А. В.³¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники²Белорусский национальный технический университет³Республиканский научно-практический центр спорта

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В условиях отсутствия в РФ и РБ отечественных систем постоянного мониторинга уровня глюкозы (СНМГ) в межклеточной жидкости предлагается разработка отечественной системы СНМГ. СНМГ состоит из подкожного электрохимического сенсора с глюкозооксидазой, блока беспроводной передачи данных и приемного блока (ресивер или смартфон) с программным обеспечением для визуализации и анализа. В процессе электрохимической реакции окисления глюкозы глюкозооксидазой возникает электрический ток, сила которого пропорциональна концентрации глюкозы и описывается уравнением Фарадея. Непрерывная регистрация с усреднением за 1–5 минутные интервалы обеспечивает мониторинг уровня глюкозы в реальном времени. Создание СНМГ повысит доступность контроля диабета, обеспечит безопасность, поддержит развитие наукоемких производств и экспорта.

Ключевые слова: сахарный диабет (СД), система непрерывного мониторинга глюкозы (СНМГ), биосенсоры.

CONTINUOUS GLUCOSE MONITORING SYSTEM IN HUMAN BIOLOGICAL MEDIA (CAPILLARY BLOOD, INTERSTITIAL FLUID)

Alekseev I. A.¹, Kudina A. V.¹, Gabets V. L.², Alekseev A. V.³¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics²Belarusian National Technical University³Republican Scientific and Practical Center of Sports

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. In the absence of domestically developed continuous monitoring systems for interstitial-fluid glucose levels in the Russian Federation and Belarus, it is proposed to develop a domestic continuous glucose monitoring system (CGMS). The CGMS consists of a subcutaneous electrochemical sensor functionalized with glucose oxidase, a wireless data-transmission module, and a receiver unit (either a dedicated receiver or a smartphone) equipped with software for visualization and analysis. During the electrochemical oxidation of glucose by glucose oxidase, an electric current is generated whose magnitude is proportional to the glucose concentration and is described by Faraday's equation. Continuous recording with averaging over 1–5-minute intervals provides real-time monitoring of glucose levels. The creation of a CGMS will increase the availability of diabetes management, will ensure health safety, and support the development of high-tech manufacturing and export.

Keywords: diabetes mellitus (DM), continuous glucose monitoring system (CGMS), biosensors.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: a.kudina@bsuir.by

По данным The Lancet на 13/11/2024 – число взрослых, с сахарным диабетом (СД) в мире превысило 800 млн, рост более чем в четыре раза с 1990 г. Необходимы решительные действия для борьбы с заболеваемостью и проблемой недостаточного охвата лечением [1]. В РБ на начало 2023 года состояло под наблюдением более 360 тыс. пациентов с СД, из них большая часть – СД 2 типа. Ежегодный прирост первичных пациентов с СД составляет 5–8 % [1, 2]. По данным [3] в РФ и РБ до настоящего времени не производятся СНМГ.

Идея данной работы – создание отечественной СНМГ (рисунок 1). Измерение уровня глюкозы (ГЛ) в биосредах человека – основной метод диагностики и контроля СД [4].

Датчик (сенсор) 1 устанавливается подкожно, измеряет уровень ГЛ в межклеточной жидкости, работает непрерывно и длительно (дни, недели).

Передающий блок (трансмисмиттер) 2 размещается на поверхности кожи (встроенный или съемный), передает измеряемые параметры (уровень ГЛ) по Bluetooth или другим протоколам на ресивер.



Рисунок 1 – Основные компоненты СНМГ

Приемный блок (ресивер) 3 с установленным ПО обрабатывает, хранит и отображает полученные данные уровня ГЛ в реальном времени.

Глюкозооксидазный метод (ГОМ) – один из самых точных и распространенных методов определения уровня ГЛ в клинических лабораториях. В основе метода – ферментативная реакция с использованием фермента глюкозооксидазы (ГОК) (рисунок 2). ГЛ поступает из межклеточной жидкости через микроиглы на мембрану с осажженным ферментом ГОК и окисляется до глюконовой кислоты, при этом образуется перекись водорода (H_2O_2) [5, 6].

H_2O_2 – нестабильное соединение, которое может быть окислено или восстановлено на электроде. Электроны, образовавшиеся в результате окисления H_2O_2 , создают электрический ток, величиной прямо пропорциональной концентрации H_2O_2 , и пропорциональной исходной концентрации ГЛ. Чем выше уровень ГЛ, тем больше H_2O_2 образуется, и тем сильнее ток.

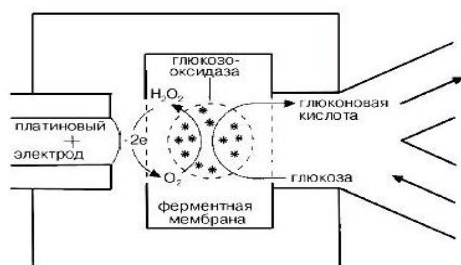


Рисунок 2 – Схема электрохимических процессов на сенсоре при глюкозооксидазном методе определения глюкозы

Уравнение Фарадея – основа для расчета характеристик электрохимических реакций.

$$I = n \times F \times A \times D \times \frac{C}{\delta}, \quad (1)$$

где I – сила тока, (А); n – число электронов, переносимых в реакции (для H_2O_2 обычно $n = 2$); F – постоянная Фарадея (96485 Кл/моль); A – площадь поверхности электрода, (m^2); D – коэффициент диффузии глюкозы или H_2O_2 , (m^2/c); C – концентрация глюкозы, (моль/ m^3); δ – толщина диффузионного слоя, (м).

Регистрация результатов непрерывная. Для исключения ошибок измерения необходимо производить с минимальным интервалом, с выводом среднеарифметического значения параметра каждые 1–5 минут, позволяя отслеживать уров ГЛ в режиме реального времени.

Формула подсчета среднеарифметического значения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое, n – количество значений, x_i – каждое значение в наборе данных.

Важными факторами для определения уровня ГЛ являются: простота, низкая стоимость, точность измерения, доступность исследования. Оптимальный вариант – ежедневно носимое устройство, простое в обслуживании.

Разработка прототипа СНМГ и производство описанного прибора на территории РБ имеет ряд преимуществ: обеспечение пациентов и системы здравоохранения РБ отечественным продуктом; лучший контроль и борьба с осложнениями СД; увеличение продолжительности жизни; вклад в государственную безопасность; развитие и организация наукоемкого производства; возможность организации экспорта конкурентоспособного продукта.

Литература

1. Urgent action needed as global diabetes cases increase four-fold over past decades // World Health Organization. – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/13-11-2024-urgent-action-needed-as-global-diabetes-cases-increase-four-fold-over-past-decades> (дата обращения: 20.12.2025).
2. 14 ноября – Всемирный день диабета // Министерство здравоохранения Республики Беларусь. – URL: <https://minzdrav.gov.by/ru/novoe-na-sayte/14-noyabrya-vsemirnyy-den-diabeta> (дата обращения: 20.12.2025).
3. Минпромторг анонсировал выход на рынок российских систем непрерывного мониторинга глюкозы // Фармацевтический вестник. – URL: <https://pharmvestnik.ru/content/news/Minpromtorg-anonsiroval-vyход-na-rynok-rossiiskih-sistem-nepreryvnogo-monitoringa-glukozy.html> (дата обращения: 20.12.2025).
4. Сахарный диабет: обновление классификации и особенности диагностики различных типов: учеб.-метод. материал / Бел. гос. мед. ун-т, Каф. эндокринологии. – Минск: БГМУ, 2021. – URL: https://www.bsmu.by/upload/docs/kafedri/k_endokrin/2021-2/12-21/uch-method/2-12/diabet-obn.pdf (дата обращения: 20.12.2025).
5. Глюкоза крови // Биохимия и молекулярная биология: образоват. портал. – URL: <https://bio-khimija.ru/uglevody-krovi/glucos-krovi.html> (дата обращения: 20.12.2025).
6. Момыналиев, К. Т. Обзор современных датчиков для непрерывного мониторингирования уровня глюкозы / К. Т. Момыналиев, М. В. Прокопьев, И. В. Иванов // Сахарный диабет. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 621–632.

УДК 004.89, 004.93, 53.087, 616-073.75

РАСПОЗНАВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Балухо И. Н., Адамович В. Ю., Жукова М. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.

НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета,
Минск, Беларусь

Аннотация. Создана и обучена искусственная нейронная сеть для решения задач распознавания объектов на рентгеновских изображениях в условиях низкого потока фотонов. Обученная нейронная сеть предназначена для распознавания десяти классов изображений объектов, характеризующихся дискретной структурой. Создана база данных изображений объектов полученных в условиях малых потоков фотонов. Точность разработанной нейронной сети достигает более 80 %.

Ключевые слова: распознавание изображений, рентгеновское излучение, нейронная сеть.

NEURAL NETWORKS FOR X-RAY IMAGE RECOGNITION

Balukho I. N., Adamovich V. Y., Zhukova M. N., Dudchik Y. I., Kolchevsky N. N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU, Minsk, Belarus

Abstract. Developed and trained an artificial neural network to recognize objects in X-ray images under low photon flux conditions. The trained neural network is designed to recognize ten classes of images of objects characterized by a discrete structure. Created a database of images of objects in low photon flux. The accuracy of the developed neural network reaches more than 80 %.

Keywords: image recognition, X-ray, neural network.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7 – 403, 220045, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Современные исследования в области медицины, промышленного контроля и научных экспериментов требуют автоматизированного анализа объектов на рентгеновских изображениях. Однако традиционные методы обработки оказываются малоэффективными при низких потоках фотонов, когда качество визуализации определяется высоким уровнем шумов и дискретностью потока фотонов.

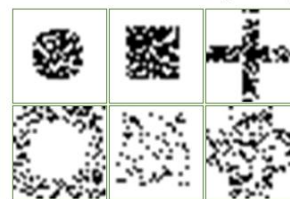
В 2024 году Нобелевская премия по физике была присуждена Джону Хопфилду и Джеффри Хинтону за фундаментальные работы в области искусственных нейронных сетей. Эти достижения демонстрируют, что методы искусственного интеллекта эффективно применяются для анализа и обработки изображений.

Цель работы исследовать возможности использования искусственных нейронных сетей для решения задачи распознавания объектов на рентгеновских изображениях в условиях низкого потока фотонов.

Для решения задачи распознавания с помощью генератора случайных чисел получено более 109 изображений размером 28×28 пикселей, распределенных по признакам на 10 классов: квадрат, круг, линия и т. д. Часть данных изображений используется для обучения нейронной сети, часть для тестирования нейронной сети. Примеры изображений показаны на рисунке 1.

В качестве модели нейронной сети выбрана структура MLP (многослойный перцептрон) из-за относительной простоты программной реализации и низких требований к вычислительной мощности компьютера. Структура нейронной сети состояла 4

слоев – входного, двух скрытых и выходного слоя. Входной слой содержал 28×28 пикселей + 1 нейрон смещения – 785 нейронов, скрытые слои по 20 нейронов и выходной слой 10 нейронов в соответствии с числом классов изображений.

Рисунок 1 – Примеры изображений размером 28×28

Математическая модель нейрона может быть описана:

$$Y = \sum_i w_i X_i + b, \quad (1)$$

где Y – выходной сигнал нейрона, w_i – весовые коэффициенты нейронной сети, X_i – входные сигналы нейрона, b – параметр, задающий линейное смещение уровня выходного сигнала.

Искусственная нейронная сеть длительно обучается на тестовой базе изображений с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. В результате обучения формируются и корректируются w_i весовые коэффициенты каждого слоя нейронной сети. Процесс обучения построенной нейронной сети занимает длительное время. Процесс обучения прекращается при достижении заданной точности распознавания, как правило, более 70 %. Если ошибка обучения велика и в процессе обучения не снижается, то процесс

обучения прекращается и нейронная сеть модернизируется. Важным в процессе обучения является затраченное время, которое существенно зависит от характеристик вычислительной системы. Процесс обучения построенной искусственной нейронной сети показан на рисунке 2. Начальная точка с точность 10 % соответствует начальным случайным значениям w_i весовых коэффициентов каждого слоя нейронной сети, и соответствует средним статистическим оценкам.

Эпоха в обучении нейросети представляла собой цикл прохождения всего набора из 500 000 обучающих изображений через нейронную сеть. Точность рассчитывалась как отношение количества правильно распознанных изображений к общему числу тестовых изображений равному 100 000. Через каждую 1000 эпох изменялся набор обучающих и тестовых изображений. Как показано на рисунке 2 точность распознавания достигла 81–84 % и дальнейшее обучение со сменой базы изображений не приводило к росту точности распознавания.

Обученная искусственная нейронная сеть использовалась для решения задачи распознавания класса объектов в зависимости от количества активных пикселей в изображении объекта. Результаты моделирования показаны на рисунке 3. Точность нейронной сети достигает более 90 % при количестве активных пикселей более 200 на изображении размером 28×28 .

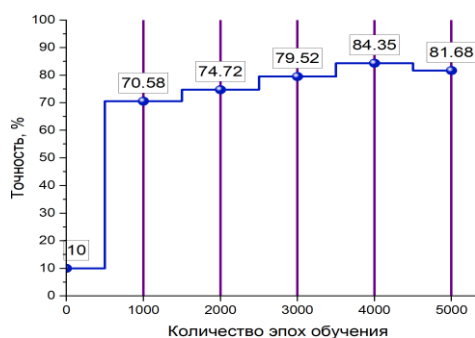


Рисунок 2 – Прогресс обучения искусственной нейронной сети

При малом числе активных пикселей изображения разных классов становятся визуально неотличимы, что и определяет низкую точность обученной нейронной сети. Важное значение

в задачах распознавания имеют два фактора: скорость работы и качество распознавания. Обученная нейронная сеть обрабатывает и распознает с высокой достоверностью более 100 000 изображений объектов за время меньше минуты, что свидетельствует о высокой эффективности такого подхода к решению задачи.

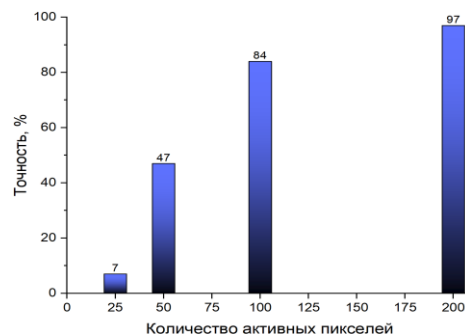


Рисунок 3 – Зависимость точности обученной искусственной нейронной сети от качества изображения

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Распознавание изображений объектов в условиях малых потоков фотонов с помощью искусственного интеллекта / М. Н. Жукова, И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния: материалы МНТК, Минск, 22–23 мая 2025 г. / Редкол.: П. В. Кучинский (гл. ред.) [и др.]. – Мн.: СтройМедиаПроект, 2025. – С. 236–237.
2. Регистрация фотонов рентгеновского диапазона при помощи ПЗС матриц / Н. В. Трапенко, И. Н. Балухо, А. Н. Петлицкий [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы МНТК / редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2024. – С. 219.
3. Распознавание изображений в условиях малых потоков фотонов / Н. В. Трапенко, И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Приборостроение-2023: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, нояб. 2023 г. / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2023. – С. 282–283.

УДК 681.586:534.1

РАЗРАБОТКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, УСТОЙЧИВОГО К ВИБРАЦИЯМ И УДАРАМ

Беницевич А. П., Люцко К. С., Чижик С. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается процесс разработки микромеханического гироскопа, устойчивого к вибрациям и ударам. Разработана методика проектирования с использованием MATLAB/Simulink для моделирования. Особое внимание уделено конечному элементному анализу (КЭ-анализу) для оптимизации конструкции.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, инерциальный чувствительный элемент, сапр, вибрации, удары, моделирование, КЭ-анализ.

DEVELOPMENT OF A VIBRATION AND SHOCK RESISTANT MICROMECHANICAL GYROSCOPE

Benitsevich A. P., Liutsko K. S., Chizhik S. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The process of developing a vibration and shock resistant micromechanical gyroscope is considered. A literature review on the design of micromechanical gyroscopes has been conducted. A design methodology using MATLAB/Simulink for modeling has been developed, with a focus on finite element analysis (FEA) for structure optimization. The economic efficiency of the development has been calculated.

Keywords: micromechanical gyroscope, inertial sensitive element, cad, vibrations, shocks, modeling, finite element analysis.

*Адрес для переписки: Люцко К. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by*

Целью разработки микромеханического гироскопа (ММГ), устойчивого к вибрациям и ударам, является создание устройства, обеспечивающего высокую точность измерений угловой скорости в условиях динамических нагрузок. ММГ применяются в авиации, автомобильной промышленности, робототехнике и потребительской электронике благодаря низкой стоимости, компактности и надежности.

Объектом исследования является процесс проектирования ММГ с повышенной устойчивостью к внешним механическим воздействиям. Современные ММГ уступают по точности традиционным гироскопам, но превосходят их по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению. Проектирование ММГ требует использования систем автоматизированного проектирования (САПР) и сложных методов анализа, таких как конечный элементный анализ (КЭ-анализ).

Методика проектирования такого микрогироскопа заключается в функциональной схеме ММГ, включающая инерциальный чувствительный элемент (ИЧЭ) и систему управления. На основе схемы создана математическая модель, учитывающая жесткость упругих подвесов и массу подвижных рамок. Моделирование проводилось в Matlab/Simulink для анализа динамики системы.

Для повышения устойчивости к ударам применены двухступенчатые гасители, снижающие напряжения в местах контакта подвижных и неподвижных частей конструкции.

КЭ-анализ использован для оптимизации конструкции ММГ, в частности, для определения максимальной длины гребенчатых структур, обеспечивающих измерение угловой скорости. Основные этапы КЭ-анализа:

1. Создание 3D-модели: Построена модель ММГ в САПР (например, ANSYS или COMSOL Multiphysics), включающая гребенчатые структуры, упругие подвесы и гасители ударов.

2. Дискретизация: Конструкция разбита на конечные элементы (тетраэдры), что позволяет численно решать уравнения механики сплошных сред.

3. Граничные условия: Заданы внешние воздействия (вибрации с частотой 10–1000 Гц, ударные нагрузки до 1000 g), материал (кремний, предел прочности ~7 ГПа), жесткость подвесов и масса рамок.

4. Решение уравнений: Рассчитаны напряжения, деформации и перемещения. Использованы уравнения равновесия и закон Гука для линейной упругости.

5. Анализ результатов: Выявлены зоны максимального напряжения (например, в основании гребенок). Максимальная длина гребенок оптимизирована для предотвращения разрушения при нагрузках.

Из-за того, что удары амплитудой 30 000 g приводят к перемещениям, которые превышают позволяющие зазоры (4–7,5 мкм), а КЭ-анализ позволил определить, что длина гребенчатых структур не должна превышать 500 мкм для обеспечения прочности при ударных нагрузках. Из-за этого можно рассмотреть гироскоп с сферическим типом упора, так как при нагрузках он показывает наименьшее напряжение, которое составляет 489 МПа.

Также разработаны двухступенчатые гасители ударов включающие упругие балки (ширина 7 мкм, длина 40 мкм) и жесткие элементы, снижающие напряжения до 474,19 МПа при зазорах 0,5–7,5 мкм, которые снизили пиковые напряжения на 30 %, что подтверждено моделированием. Данные гасители продемонстрированы на рисунке 1.

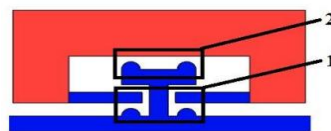


Рисунок 1 – Двухступенчатый гаситель удара

Пример такого микрогироскопа, который оборудован двухступенчатыми гасителями ударами, а также имеет сферический упор продемонстрирован на рисунке 2.

Разработанный ММГ может использоваться в системах стабилизации автомобилей (например, в системах ESP), беспилотных летательных аппаратах (дронах) и промышленных роботах.

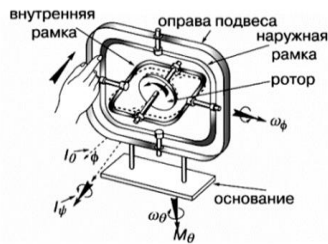


Рисунок 2 – Модель традиционного гироскопа с тремя степенями свободы

Устойчивость к вибрациям (до 1000 Гц) и ударам (до 1000 g) делает его пригодным для суровых условий эксплуатации, таких как авиационные и военные приложения. Интеграция с микроконтроллерами (например, STM32) обеспечивает низкое энергопотребление и высокую скорость обработки данных. Применение двухступенчатых гасителей повысило надежность конструкции. практическая значимость заключается в возможности использования ММГ в автомобильной электронике, робототехнике и авиации, где требуется высокая надежность

в условиях динамических нагрузок. Методика проектирования микромеханического гироскопа, устойчивого к вибрациям и ударам состоит из следующих шагов:

1. Входные данные.
2. Функциональная схема, математическая модель.
3. Технологические нормы изготовления
4. 3D-модель.
5. Компьютерное моделирование влияния вибраций и ударов.
6. КЭ анализ влияния вибраций и ударов.
7. Установка двухступенчатых гасителей удара.
8. Оптимизация длины гребенок.

Литература

1. Песин, А. Б. Гироскопические системы: теория и практика / А. Б. Песин. – М.: Машиностроение, 2018. – 320 с.
2. Матвеев, В. А. Микроэлектромеханические системы (MEMS): проектирование и применение / В. А. Матвеев, Л. Н. Баскин. – СПб.: Лань, 2020. – 256 с.
3. Журавлев, В. Ф. Основы теоретической механики гироскопов / В. Ф. Журавлев. – М.: Физматлит, 2015. – 288 с.

УДК 621.317

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Богдан П. С., Зайцева Е. Г., Чайкова Л. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Использование теоремы отсчетов позволило установить, что наличие дискретизации при измерениях спектрофотометров приводит к возникновению составляющей погрешности измерений. Значение этой погрешности зависит от спектрального состава измеряемого излучения, с одной стороны, и разрешающей способности спектрометра, с другой. Проведены расчеты погрешности для различных спектральных излучений и разной разрешающей способности спектрометров.

Ключевые слова: спектрометр, оптический спектр излучения, дискретизация, теорема отсчетов

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SPECTROMETER RESOLUTION FOR MEASUREMENT ERROR

Bogdan P. S., Zaytseva E. G., Chaikova L. D.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The use of the sampling theorem made it possible to establish that the presence of sampling during spectrophotometer measurements leads to a component of measurement error. The value of this error depends on the spectral composition of the measured radiation, on the one hand, and the resolution of the spectrometer, on the other. There were calculations of errors carried out for various spectral radiations and different resolutions of spectrometers.

Keywords: spectrometer, optical radiation spectrum, sampling, sampling theorem

Адрес для переписки: Богдан П. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by

В современных спектрометрах измерение развернутого по пространственной координате спектрального распределения светового излучения производится с использованием совокупности щелей и линейки светочувствительных элементов. При этом происходит дискретизация измеряемого сигнала по длине волны излучения и, соответственно в приборе, по пространственной координате. Наличие дискретизации сигнала может явиться источником появления ложных гармонических составляющих, которые, складываясь с исходным сигналом, являются одним из

источников погрешности измерений. Целью настоящей работы является исследование влияния разрешающей способности спектрометра, определяющей шаг дискретизации по длине волны, на значение составляющей погрешности измерений, обусловленной наличием дискретизации.

Исключить появление ложных гармонических, составляющих возможно при соблюдении теоремы отсчетов [1]. Теорема гласит: если сигнал, не содержащий частот выше f_{max} , можно полностью передать последовательностью отсчетов, следующих через период T , где

$$T \leq \frac{1}{2f_{\max}},$$

причем после дискретизации необходима фильтрация сигнала П-образным фильтром со срезом амплитудно-частотной характеристики вне диапазона частот $(-f_{\max}, f_{\max})$.

Отсюда очевидно, что, т. е. в рассматриваемом случае разрешающая способность спектрометра $\Delta\lambda$ (период дискретизации) зависит от максимального значения частоты $f_{\max}$, при котором амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) излучения обращается в 0.

Спектральное распределение источников в пределах видимого спектра ограничено по длине волны. Отсюда следует, что АЧХ по частотной координате не ограничено, т. е. не обращается в 0 при всех значениях частоты. Поэтому при любой разрешающей способности спектрофотометра $\Delta\lambda$, т. е. при любом периоде дискретизации T АЧХ имеет бесконечный не обрезанный «хвост» с уменьшающимися с ростом частоты амплитудами и с максимальным значением ε . Этот «хвост» в результате дискретизации складывается с исходным значением АЧХ и создает погрешности с максимально возможным значением ε . Эти погрешности низкочастотные, т. е. их период вдвое больше разрешающей способности спектрометра $\Delta\lambda$. Из вышеизложенного очевидно, что значение погрешности зависит как от характера спектрального распределения излучения, так и от разрешения спектрометра.

Вышеописанная методика расчета ε была применена для спектральных распределений спектров излучения различного характера, графики которых приведены на рисунках 1–3.

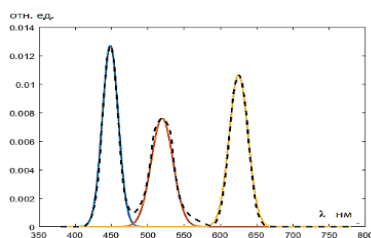


Рисунок 1 – График излучения RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ [2] (сплошные линии) и его аппроксимация (пунктир)

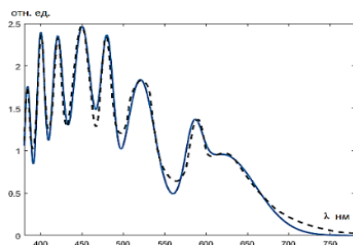


Рисунок 2 – График излучения 13 светодиодных групп, имитирующих естественное излучение [3], (сплошная линия) и его аппроксимация (пунктир)

Для каждого из трех представленных на рисунках 1–3 распределений светового излучения были рассчитаны зависимости максимально возможной

погрешности ε за счет дискретности измерений от разрешающей способности спектрометра $\Delta\lambda$. На рисунке 4 представлен график такой зависимости для распределения, приведенного на рисунке 1.

Абсолютное значение погрешности есть произведение относительной погрешности ε на среднее значение интенсивности исследуемого спектрального излучения.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что для спектрометров с разрешением 1 нм погрешность за счет дискретизации настолько мала ($5,7 \times 10^{-12}$, 7×10^{-4} и 14×10^{-4} соответственно для приведенных на рисунках 1–3 распределений), что ею можно пренебречь. Для спектрометров с большим значением разрешающей способности (10 нм и выше), эти погрешности могут оказаться существенными. Например, при разрешении 10 нм эти погрешности для распределений, приведенных на рисунках 1–3, составляют соответственно 9×10^{-4} , 43×10^{-3} и 17×10^{-3} .

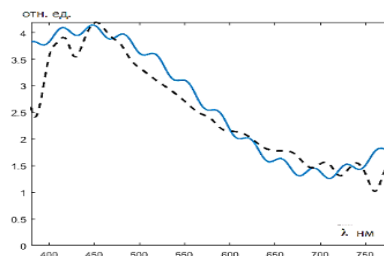


Рисунок 3 – График естественного излучения при цветовой температуре 10 000 градусов Кельвина [4] (сплошная линия) и его аппроксимация (пунктир)

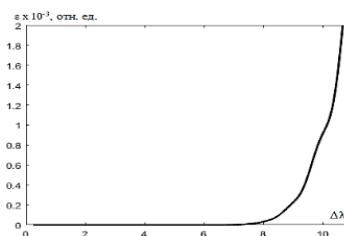


Рисунок 4 – График зависимости максимально возможной погрешности ε за счет дискретности от разрешающей способности спектрометра $\Delta\lambda$ для излучения RGB-SMD-светодиода

Литература

1. Руфов, А. А. Теорема отсчетов и ее применение для восстановления модулированных сигналов / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков // Приволжский научный вестник. – 2012. – № 12 (15). – С. 13–16.
2. Никифоров, С. «S-класс» полупроводниковой светотехники / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2009. – № 6. – С. 88–91.
3. Investigation of criteria for comparing the spectral distribution of natural and LED radiation / P. S. Bogdan, E. G. Zaytseva, A. I. Stepanenko // Devices and Methods of Measurements. – 2024. – V. 15, № 2. – P. 120–130.
4. Blume, C. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood / C. Blume, C. Garbaza, M. Spitschan // Somnologie (Berl.). – 2019. – V. 3, № 3. – P. 147–156.

УДК 537.533.3

МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИЦИЯХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С ИОНАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**Гайдук Ю. С.¹, Луговский А. А.¹, Радкевич Л. В.², Журавский Н. А.², Усенко А. Е.³, Махнач Л. В.³**¹Учреждение БГУ «Республиканский центр проблем человека»²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси³Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Исследован магнитоологический эффект в композициях водных растворов поливинилового спирта с неорганическими солями ряда переходных металлов, в частности, железа, никеля, кобальта. Величина эффекта зависит от природы и концентрации ионов переходного металла. Добавление к композиции ферромагнитных порошков приводит к суммированию магнитоологических эффектов. Полученные композиции могут быть использованы в качестве среды-носителя магнитоологических жидкостей на водной основе.

Ключевые слова: магнитоологические жидкости, поливиниловый спирт, напряжение сдвига

MAGNETORHEOLOGICAL EFFECT IN COMPOSITIONS OF AQUEOUS SOLUTIONS OF POLYVINYL ALCOHOL WITH IONS OF TRANSITION METALS**Haiduk Yu. S.¹, Lugovskiy A. A.¹, Radkevich L. V.², Zhurauski M. A.², Usenka A. E.³, Makhnach L. V.³**¹Institution of the BSU "Republican Center for Human Problems"²A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus³Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. The magnetorheological effect in compositions of aqueous solutions of polyvinyl alcohol with inorganic salts of various transition metals, namely iron, nickel, and cobalt, was investigated. The magnitude of the effect depends on the nature and concentration of the transition metal ions. Adding ferrimagnetic powders to the composition results in the summation of the magnetorheological effects. The prepared compositions can be used as carrier media for water-based magnetorheological fluids.

Keywords: magnetorheological fluids, polyvinyl alcohol, shear stress

Адрес для переписки: Гайдук Ю. С., ул. Курчатова, 7/1, г. Минск 220045, Республика Беларусь

e-mail: j_hajduk@bk.ru

Магнитоологические жидкости (МРЖ) – интеллектуальные материалы, которые значительно изменяют свои механические свойства под действием магнитного поля.

Одним из важных подвидов таких жидкостей являются магнитоологические жидкости на водной основе (ВМРЖ), обладающие рядом преимуществ, таких как экологическая безопасность, низкая стоимость и хорошая совместимость с другими материалами. В отличие от традиционных МРЖ на масляной основе, ВМРЖ используют воду или водные растворы в качестве переносной среды. Это делает их более экологичными и безопасными для окружающей среды, а также снижает риск пожара и коррозии. Параметры МРЖ зависят от состава, уровня магнитного поля и степени стабильности системы.

На рисунке 2 представлены зависимости напряжения сдвига для ряда композиций ПВС с ионами переходных металлов, с добавкой порошка феррита кобальта (20 % мас). Напряжение сдвига суспензии феррита кобальта составляло 500 Па при скорости сдвига 33 с-1 и магнитной индукции 625 мТл [3]. Основными компонентами ВМРЖ являются магнитные частицы (ферриты, металлические наночастицы и др.), вода или водные растворы (например, гидратированные соли или гели), стабилизаторы и поверхностно-активные вещества, чтобы

предотвратить агрегацию частиц. Средние значения напряжения сдвига ВМРЖ в различных условиях лежат в диапазоне 50–200 кПа [1]. Ранее был обнаружен магнитоологический эффект в композициях водного раствора поливинилового спирта (ПВС) и хлорида кобальта (II). Возникновение эффекта связывалось с образованием координационных связей между гидроксильными группами ПВС и ионами Co^{2+} [2]. В комплексных соединениях такого типа, которые могут быть полиядерными, магнитные свойства определяются характером обменных взаимодействий за висит от деталей геометрического и элек тронного строения молекул. При воздействии внешнего магнитного поля в таких композициях часто происходит формирование магнитных агрегатов или структур, что приводит к изменению их вязкостных и упругих свойств.

Методика эксперимента. В работе использовался ПВС марки 540PS (водный раствор 10 % мас.), соли $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ («ч»), $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ («ч»), $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ («ч»), $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ («ч»). Мольное отношение ПВС: Me^{2+} составляло 8:1 и 4:1. Порошок CoFe_2O_4 получен по методике [3].

Зависимости напряжения сдвига суспензий от скорости сдвига получены с помощью ротационного вискозиметра HAAKE RV 12, оснащенного индуктором магнитного поля, с измерительной ячейкой типа «пластина–пластина» ($T = 20^\circ\text{C}$).

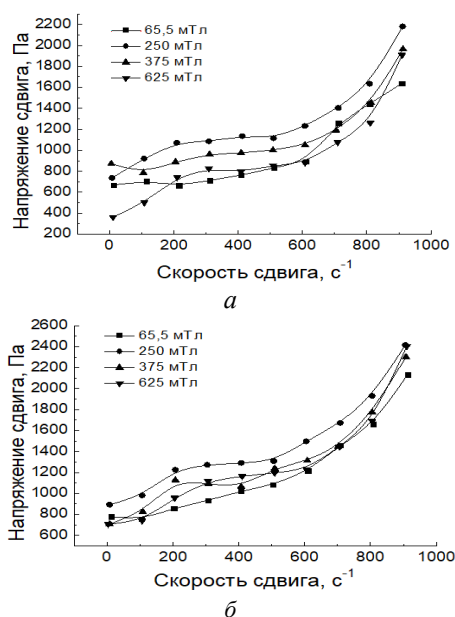


Рисунок 1 – Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига при разных величинах магнитного поля: (а) ПВХ- CoCl_2 , (б) ПВХ- NiCl_2 (мольное отношение 4:1)

Обсуждение результатов. Добавление солей к 10 % водному раствору ПВХ приводит к заметному увеличению вязкости раствора. Измерение вязкости в магнитном поле показало, что все исследованные композиции проявляли магнито-реологический эффект, при этом композиции, содержащие соли никеля и кобальта – в большей степени. Также величина магнито-реологического эффекта была большей в образцах с большим содержанием растворенной соли.

Как следует из рисунка 2, добавление ферри-магнитного порошка увеличило магнитную чувствительность композиции и способствовало более выраженному изменению ее свойств под воздействием магнитного поля.

Выводы. Исследованные композиции ПВХ с солями переходных металлов могут быть использованы в качестве жидкости-носителя для

ВМРЖ. В отличие от немагнитных гелей, они способствуют увеличению напряжения сдвига (особенно в случае композиции ПВХ с хлоридом никеля), и, возможно, улучшению других эксплуатационных свойств ВМРЖ.

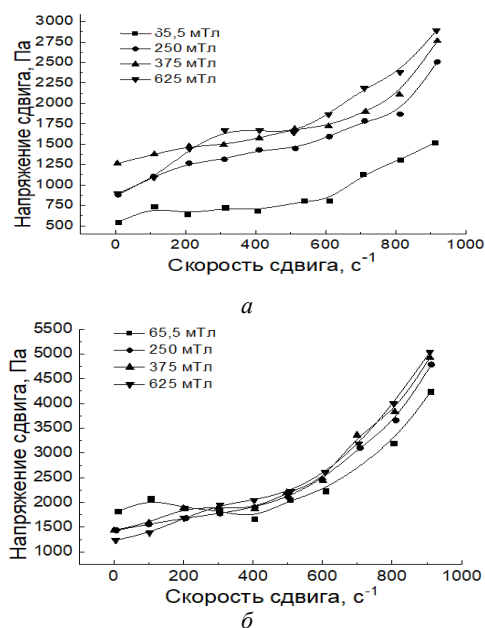


Рисунок 2 – Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига при разных величинах магнитного поля: (а) ПВХ- CoCl_2 с добавкой CoFe_2O_4 (б) ПВХ- NiCl_2 с добавкой CoFe_2O_4 (мольное отношение 4:1)

Литература

1. Genc, E. Water-based magnetorheological fluids and their properties / E. Genc, N. K. Durlu, I. Bayram // *Materials & Design*. – 2010. – V. 31, № 6. – P. 3006–3011.
2. Structural applied field-induced metastability of the compositions based on polyvinyl alcohol, orthophosphoric acid, and variable-valence metals / T. G. Lazareva [et al.] // *International Journal of Modern Physics B*. – 1999. – V. 13, № 14–16. – P. 1956–1965.
3. Ferrites of cobalt and cobalt-zinc for magnetorheological materials: preparation and properties / Yu. S. Haiduk [et al.] // *Next Materials*. – 2025. – Vol. 8. – Art. 100652.

УДК 536.2:621.375.826

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕКЛОЛЮМИНОФОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Град Д. В.¹, Чжан Шенглонг², Лью Жиганг², Лишик С. И.¹

¹Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт энергетических исследований Шаньдунской академии наук, Цзинань, Китай

Аннотация. Проведено моделирование температурных полей и полей механических напряжений в стеклолюминофорных преобразователях на микроструктурированной и плоской подложках. Показано, что использование подложки с массивами микроштырьков позволяет существенно снизить максимальную рабочую температуру и уровень термических напряжений в люминофорном слое по сравнению с традиционной плоской подложкой, что повышает надежность и долговечность преобразователя.

Ключевые слова: стеклолюминофорный преобразователь, микроструктурированная подложка.

THERMOMECHANICAL SIMULATION OF PHOSPHOR-IN-GLASS CONVERTERS BASED ON MICROSTRUCTURED METAL SUBSTRATES

Hrad D. V.¹, Zhang Shenglong², Liu Zhigang², Lishik S. I.¹

¹ Center of LED and Optoelectronic Technologies of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

² Shandong Energy Research Institute, Jinan, China

Abstract. Temperature and mechanical stress fields in glass-phosphor converters on microstructured and flat substrates were simulated. It was shown that using a substrate with micropin arrays significantly reduces the maximum operating temperature and thermal stress levels in the phosphor layer compared to a traditional flat substrate, increasing the reliability and durability of the converter.

Keywords: Phosphor-in-Glass converter, microstructured substrate.

Адрес для переписки: Лишик С. И., ул. Логойский тракт, 20, г. Минск 220090, Республика Беларусь, e-mail: rnd@ledcenter.by

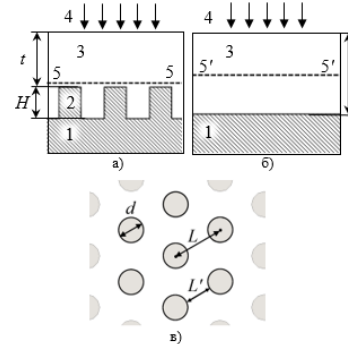
Стеклолюминофорные преобразователи (СЛП) находят широкое применение в мощных источниках белого света, таких как лазерные фары, проекторы, прожекторы и поисковые фонари [1]. Ключевой проблемой при эксплуатации СЛП является интенсивное тепловыделение, вызванное поглощением части энергии лазерного излучения частицами люминофора. Поскольку стеклолюминофорный слой (ЛС) характеризуется низкой теплопроводностью, это приводит к значительному локальному перегреву и, как следствие, термической деградации и механическому разрушению СЛП. Металлические подложки обладают высокой теплопроводностью, но из-за различных коэффициентов теплового расширения не совместимы с большинством типов стекол. В данной работе анализируется возможность использования микроструктурированных подложек для решения вышеуказанной проблемы.

Рассмотрим две модели СЛП: на микро-структурированной (рисунок 1, а, в) и плоской (рисунок 1, б) медных подложках. Поверхность микроструктурированной подложки содержит массив цилиндрических микроштырьков, расположенных в гексагональном порядке. Диаметр микроштырьков $d = 28,8$ мкм, высота H варьировалась в диапазоне 10–150 мкм, а зазор между ними L' – в диапазоне 14,4–57,6 мкм (от 50 % до 200 % от d). На поверхность обеих подложек нанесен стеклолюминофорный слой толщиной $t = 100$ –150 мкм с коэффициентом теплопроводности $0,75$ Вт/(м·К).

Моделирование проводилось в программном комплексе SolidWorks Simulation. Воздействие лазерного излучения на СЛП моделировалось в виде теплового потока мощностью 1 Вт, равномерно распределенного по пятну диаметром $\sim 0,5$ мм (площадь $\sim 0,2$ мм²), что соответствует удельной мощности тепловыделения 5 Вт/мм². Начальная температура модели и окружающей среды составляла 25 °С. На нижней границе подложки задавалось условие конвективного теплообмена.

На рисунке 2 представлены профили распределения температуры по толщине СЛП. Анализ результатов показывает, что максимальная температура

наблюдается вблизи облучаемой поверхности ЛС и линейно снижается вглубь материала, что обусловлено высоким тепловым сопротивлением ЛС.



1 – подложка, 2 – микроштырьки, 3 – стеклолюминофорный слой, 4 – лазерное излучение, 5, 5' – средняя плоскость для анализа напряжений

Рисунок 1 – Схематическое изображение моделей СЛП: а – вид сбоку микроструктурированной подложки; б – вид сбоку плоской подложки; в – вид сверху на микроструктурированную подложку

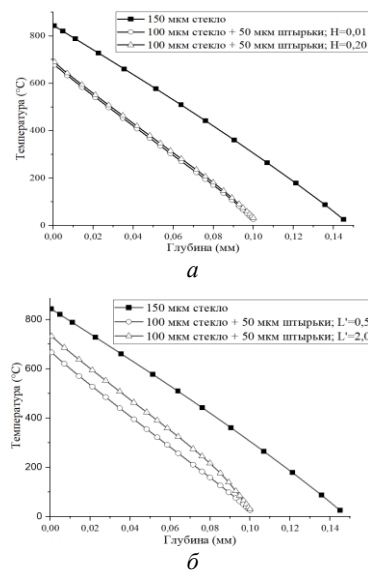


Рисунок 2 – Распределение температуры по толщине СЛП: а – в зависимости от высоты микроштырьков H ; б – в зависимости от зазора L' между микроштырьками

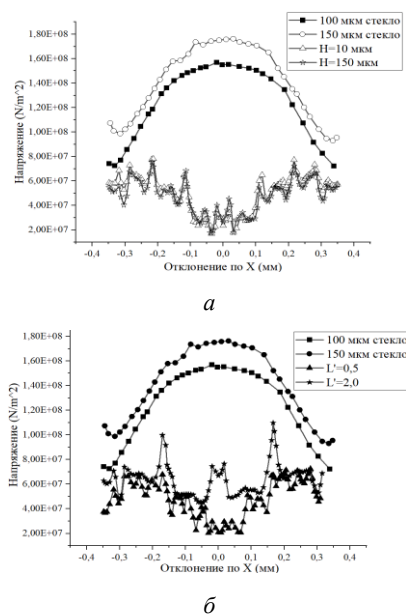


Рисунок 3 – Распределение механических напряжений в средней плоскости ЛС для плоской подложки и микроструктурированных подложек в зависимости от высоты (а), и зазора между микроштырьками (б)

Важным результатом является снижение максимальной рабочей температуры в СЛП на микроструктурированной подложке на величину до 150 °С по сравнению с плоским аналогом, что подтверждает эффективность микроструктуры для улучшения теплоотвода.

Как видно из графиков, изменение высоты микроштырьков в исследованном диапазоне (10–150 мкм) не оказывает существенного влияния на температурный профиль (рисунок 2, а). Аналогично, варьирование зазора между микроштырь-

ками также не приводит к значительным изменениям в тепловом режиме (рисунок 2, б). Это свидетельствует о том, что сам факт наличия микроструктуры, а не ее конкретные геометрические параметры в данном диапазоне, является ключевым для улучшения тепловых характеристик.

На рисунке 3 представлено распределение механических напряжений в средней плоскости ЛС (сечения 5-5 и 5'-5' на рисунке 1). В случае плоских подложек распределение механических напряжений соответствует распределению Гаусса с пиковыми значениями, которые могут превышать предел прочности стеклянного слоя и приводить к его растрескиванию. Напротив, в случае микроструктурированной подложки механические напряжения в ЛС остаются на низком уровне.

Из рисунка 3а видно, что увеличение высоты микроштырьков не влияет на уровень механических напряжений в ЛС. С другой стороны, увеличение зазора между микроштырьками приводит к росту механических напряжений в ЛС, приближаясь в пределе к плоской подложке.

Таким образом, использование микроструктурированных подложек позволяет существенно уменьшить температуру и внутренние напряжения в СЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № Ф24КИТГ-010 (ГКНТ–Китай).

Литература

1. Оптимизация технологических параметров получения стекложуноформных преобразователей / Ю.В. Трофимов [и др.] // Приборостроение-2024: материалы 17-й Межд. Науч.-техн. конф., 26–29.11.2024 г., Минск, Беларусь. – Мн.: Интегралполиграф, 2024. – С. 368–370.

УДК 681

РАСЧЕТ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Гриб А. А., Чижик С. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрено влияние ионизирующего излучения на полупроводниковые приборы и методы повышения их радиационной стойкости. Особое внимание уделено разработке композиционных материалов для радиационной защиты, сочетающих легкость, долговечность и высокую эффективность экранирования. С использованием программного комплекса SRIM исследован композит на основе эпоксидной смолы с добавлением вольфрама, показавший высокую эффективность поглощения ионов водорода. Полученные результаты подтверждают перспективность применения эпоксидных композитов в создании защитных систем для космической техники и других областей с повышенным радиационным фоном.

Ключевые слова: радиация, вольфрам, эпоксидная смола, композиционные материалы

CALCULATION OF THE ABSORPTION CAPACITY OF RADIATION SHIELDS TO PROTECT SEMICONDUCTOR DEVICES Gryb A.A., Chizhik S. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers the effect of ionizing radiation on semiconductor devices and methods for increasing their radiation resistance. Special attention is paid to the development of composite materials for radiation protection, combining lightness, durability and high shielding efficiency. Using the SRIM software package, a

composite based on epoxy resin with the addition of tungsten was studied, which showed high efficiency in absorbing hydrogen ions. The results obtained confirm the prospects of using epoxy composites in the creation of protective systems for space technology and other areas with a high radiation background.

Keywords: radiation, tungsten, epoxy resin, composite materials

Адрес для переписки: Гриб А. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by

Влияние радиации на полупроводниковые приборы представляет собой критически важную область исследований, особенно в контексте их применения в условиях повышенного радиационного фона – таких как космические аппараты, атомные электростанции или военная техника. Воздействие ионизирующего излучения может вызывать различные эффекты в полупроводниковых материалах, приводя к деградации характеристик устройств или их полному отказу. В космической отрасли особенно востребованы радиационно-стойкие, долговечные, надежные, легкие и малогабаритные электронные компоненты. Ключевой проблемой обеспечения надежности работы электронного оборудования в таких условиях остается устойчивость к ионизирующему излучению.

Для снижения воздействия радиации на полупроводниковые приборы применяются различные подходы: использование радиационно-стойких материалов, специальные конструктивные решения, технологические усовершенствования и схемотехнические методы. Радиационные экраны часто сочетают в себе несколько из этих подходов.

Разработка новых композиционных материалов позволяет преодолеть ограничения существующих радиационных экранов. С помощью компьютерного моделирования процессов облучения изучается эффективность экранирования и основные параметры материалов, что открывает путь к созданию защитных систем, отвечающих современным требованиям: легкости, экологичности, долговечности и высокому коэффициенту ослабления излучения.

Для моделирования пробега ионов в твердых телах широко используется программный комплекс SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). Модуль TRIM (Transport of Ions in Matter) в его составе позволяет рассчитывать пространственное распределение ионов, потери энергии, повреждение структуры мишени, распыление, ионизацию и генерацию фонов в сложных многокомпонентных средах.

SRIM поддерживает задание энергии ионов в широком диапазоне (до 2 ГэВ), моделирование многослойных мишеней (до 8 слоев) и с высокой точностью описывает ионизационные потери, энергетические спектры отдачи, траектории частиц, процессы имплантации и другие физические явления.

С использованием пакета SRIM был исследован композиционный материал на основе эпоксидной смолы с 50 %-ным содержанием частиц вольфрама.

Результаты показали, что образец толщиной 1 мм полностью останавливает ионы водорода с энергией до 9,6 МэВ (рисунок 2). Несмотря на высокую плотность вольфрама, общая плотность композита оказывается ограниченной из-

за матрицы из полимерной смолы, что влияет на степень защиты от ионизирующего излучения.

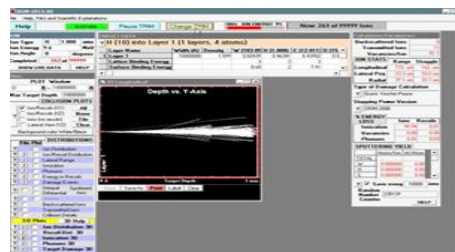


Рисунок 1 – Пробег водорода с энергией иона 9,6 МэВ в программном пакете SRIM

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация состава композиционных материалов с целью повышения их радиационной стойкости при сохранении низкой плотности и технологичности. Введение наночастиц высоко- Z элементов, использование многослойных структур и гибридных матриц открывает возможности для создания материалов нового поколения, способных эффективно экранировать широкий спектр ионизирующих излучений.



Рисунок 2 – Глубина пролета частицы водорода от энергии иона в композитном материале

Кроме того, применение методов численного моделирования в сочетании с экспериментальными исследованиями позволяет не только прогнозировать поведение композитов в условиях радиационного облучения, но и разрабатывать материалы, адаптированные под конкретные условия эксплуатации. Такой подход существенно сокращает сроки разработки и снижает стоимость создания радиационно-стойких систем, что имеет ключевое значение для космической отрасли и других высокотехнологичных сфер.

В заключение следует отметить, что композиты на основе эпоксидной смолы демонстрируют высокий потенциал для применения в радиационной защите благодаря своей термической стабильности, радиационной стойкости и доступности. Эти свойства делают их перспективными материалами для создания эффективных и экономичных радиационных экранов.

Литература

1. Multilayer radiation shield for satellite electronic components protection / H. Daneshvar [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Article number 20657.
2. Shape-memory polymeric artificial muscles: mechanisms, applications and challenges / Y. Chen [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – Art. 4246.
3. Elsaf, M. Ecofriendly and radiation shielding properties of newly developed epoxy with waste marble and WO₃

nanoparticles / M. Elsaf, N. Almousa, N. Al-Harbi // Molecules. – 2022. – Vol. 25. – Article number 5977.

4. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter: [software] / J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. – 2013. – URL: <http://www.srim.org/SRIM/Tutorials/Tutorials.htm> (date of access: 12.12.2025).

5. Леонова, Н. Л. Компьютерное моделирование: курс лекций / Н. Л. Леонова. – СПб., 2015. – 88 с.

УДК 621.3.049.77

КОМПЛЕКТ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВЫСОКОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ

Дворников О. В.¹, Чеховский В. А.²

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

²«Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета
Минск, Беларусь

Аннотация. Для проектирования аналоговых интерфейсов датчиков с высоким внутренним импедансом разработан комплект микросхем, содержащий три варианта операционных усилителей (ОУ) и два варианта зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ). Конструктивными особенностями микросхем являются: формирование устройств на специализированном базовом кристалле (БК) с реализацией требуемых функций и параметров за счет применения разных комплектов фотошаблонов для изготовления межсоединений элементов БК, применение входного полевого транзистора, управляемого *p-n*-переходом, уменьшение напряжения смещения нуля и входного тока ОУ с помощью подстройки сопротивлений резисторов. Приведены результаты моделирования статических и динамических параметров ОУ и ЗЧУ, а также зависимости длительности фронта нарастания и уровня шумов ЗЧУ от емкости датчика, соединенного со входом.

Ключевые слова: операционный усилитель, зарядочувствительный усилитель, полевой транзистор, управляемый *p-n*-переходом, базовый кристалл.

SET OF ANALOG MICROCIRCUITS FOR PROCESSING SIGNAL FROM HIGH IMPEDANCE SENSORS

Dvornikov O. V.¹, Tchekhovsky V. A.²

¹JSC «MNIPI»

²Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. A set of microcircuits containing three variants of operational amplifiers (OpAmp) and two variants of charge-sensitive amplifiers (CSA) has been developed for designing analog interfaces of sensors with high internal impedance. The design features of the microcircuits are: formation of devices on a specialized master chip (MC) with implementation of the required functions and parameters due to the use of different sets of photomasks for manufacturing interconnections of MC elements, use of an input JFET, reduction of the offset voltage and input current of the OpAmp by adjusting the resistors. The results of simulation the static and dynamic parameters of the OpAmp and CSA, as well as the dependences of the duration of the rising edge and the noise level of the CSA on the capacitance of the sensor connected to the input are presented.

Keywords: operational amplifier, charge sensitive amplifier, JFET, master chip.

Адрес для переписки: Дворников О. В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Введение. В различных областях приборостроения необходима регистрация токов крайне малой величины, т. е. менее 10^{-12} А, или обработка сигналов высокоомных датчиков, внутреннее сопротивление которых превышает сотни мегаом.

В том случае, когда необходимо измерение тока или заряда, генерируемого датчиком, обычно применяется ОУ с резистором R_F и конденсатором C_F в цепи отрицательной обратной связи, а для передачи напряжения от высокоимпедансного датчика к относительно низкоомным цепям – повторитель напряжения на ОУ. Для указанных задач преимущественно применяют ОУ с входными JFET, которые обладают

существенно меньшим уровнем низкочастотного шума по сравнению с MOS-транзисторами.

Однако, существует ряд датчиков, например, полупроводниковые детекторы, выходной сигнал которых представляет собой короткий токовый импульс. В этом случае к ЗЧУ, обрабатывающему такие сигналы, предъявляются жесткие требования по длительности фронта нарастания выходного сигнала и его зависимости от емкости датчика.

Традиционные ОУ для обеспечения высокого коэффициента усиления напряжения применяют несколько усилительных каскадов, а запас по фазе в широкой полосе частот получают с помощью

встроенной коррекции амплитудно-частотной характеристики.

Эти особенности ОУ приводят к увеличению длительности фронта нарастания выходного напряжения при включении ОУ по схеме ЗЧУ и затрудняют регистрацию коротких токовых сигналов.

Целью настоящей работы является разработка комплекта аналоговых микросхем с входным JFET, обеспечивающих обработку сигналов различных высокоимпедансных датчиков.

Конструктивно-схемотехнические особенности разработанных микросхем. Для обеспечения требуемых параметров и экономической эффективности при малосерийном производстве применены следующие технические решения:

– разработана топология экспериментального образца БК, который содержит активные и пассивные элементы, обеспечивающие реализацию всех указанных ОУ. Ряд элементов БК выполнен в виде наборов, соединения между которыми выполняются с применением пережигаемых перемычек или различных комплектов фотошаблонов;

– спроектированы ОУ (основной NJAmp1, маломощный NJAmp2, со сверхмалым входным током NJAmp4), содержащие унифицированные схемные каскады, допускающие варьирование параметров ОУ путем изменения номиналов минимального количества интегральных элементов.

Таблица 1 – Основные параметры ОУ

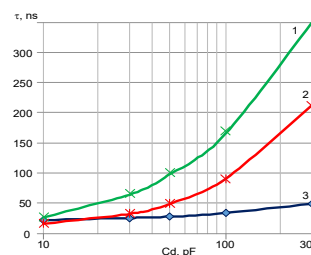
Параметр	Наименование усилителя		
	NJAmp1	NJAmp2	NJAmp4
Напряжение питания, В	0/5	0/5	0/5
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	0,58	0,44	1,43
Напряжение смещения нуля, мВ	-0,034	-0,114	0,006
Диапазон выходного напряжения, В	от 0,13 до 4,9	от 0,11 до 4,83	от 0,13 до 4,9
Коэффициент усиления напряжения	$9,4 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^5$
Входной ток, пА	15,0	15,0	0,3
Площадь усиления, МГц	3,3	3,4	2,4
Минимальный запас по фазе в полосе пропускания, град	60	71	72

Результаты схемотехнического моделирования. Параметры, характеризующие разработанные микросхемы, показаны в таблицах 1, 2

и на рисунках 1, 2. Для сравнения приведены данные для интегрального ЗЧУ с мощным входным *p*-JFET [1]. Заметим, что ЗЧУ, выполненный на ОУ типа NJAmp1, при $C_D = 10$ пФ имеет длительность фронта нарастания 474 нс, что значительно больше, чем для CSP1 и CSP2.

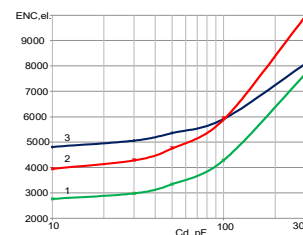
Таблица 2 – Основные параметры ЗЧУ

Параметр	Наименование ЗЧУ		
	CSP1	CSP2	[1]
Ток стока входного JFET, мА	0,467	2,527	5,613
Крутизна входного JFET, мА/В	1,675	3,688	17,72
Ток потребления, мА	0,85	2,653	6,990
Коэффициент усиления напряжения на низкой частоте	1478	2532	4430



1 – CSP1, 2 – CSP2, 3 – известный ЗЧУ [1]

Рисунок 1 – Зависимость длительности фронта нарастания ЗЧУ τ от емкости датчика C_D



1 – CSP1, 2 – CSP2, 3 – известный ЗЧУ [1]

Рисунок 2 – Зависимость эквивалентного шумового заряда ENC от емкости датчика C_D

Литература

1. Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets / O. V. Dvornikov [et al.] // 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. – 2020. – P. 1–6.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Громыко И. Л.

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

Аннотация. В настоящее время, существует множество методов диагностики трансформаторов. Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на достижение определенной сложности дальнейшего развития существующих методов и диагностических систем. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом входных факторов, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Одним из наиболее перспективных видов диагностики, на сегодняшний момент, является анализ частотных характеристик (FRA). В данной работе, для обнаружения дефектов обмоток, предлагается новый метод, на основе метода трех вольтметров и сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: трансформатор, частотные характеристики, метод трех вольтметров, сверточные нейронные сети.

TRANSFORMER CONDITION ANALYSIS USING FREQUENCY CHARACTERISTICS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Hramyka I. L.

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

Abstract. Currently, numerous different methods for transformer diagnostics exist. An analysis of the methods and diagnostic systems used indicates that further development of existing methods and diagnostic systems has reached a certain level of complexity. This is due to the complexity of input signals, a relatively large number of input factors, and nonlinear multiple dynamic relationships with other parameters. One of the most promising diagnostic methods currently available is frequency response analysis (FRA). In this paper, a new method based on the three-voltmeter method and convolutional neural networks is proposed for detecting winding defects.

Keywords: transformer, frequency response, three-voltmeter method, convolutional neural networks.

Адрес для переписки: Громыко И. Л., ул. Громоной, 3, кв. 27, г. Гомель 246030, Республика Беларусь
e-mail: ivangromyko@mail.ru

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа [1], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [2], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, FRA и другие. В последнее время FRA привлекает все больше внимания для обнаружения механических повреждений из-за его высокой чувствительности к деформациям обмоток трехфазных трансформаторов [3].

В данном материале представлен новый метод обнаружения неисправностей трансформатора, с использованием импедансной и фазо-частотной характеристики, а также сверточных нейронных сетей. Данный метод является продолжением методики, описанной в статье [4]. С помощью метода трех вольтметров рассчитывается модуль и аргумент комплексного сопротивления трансформатора в режиме холостого хода, в диапазоне от 0 до 100 кГц. Используя алгоритм линейной нормализации и библиотеку компьютерного зрения OpenCV, были получены изображения импедансной и фазо-частотной характеристик, которые затем подавались на вход сверточной нейронной сети (рисунок 1).



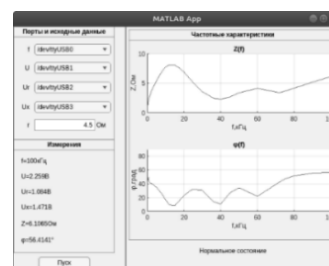
Рисунок 1 – Изображения импедансной (а) и фазо-частотной характеристик (б) нормального состояния трансформатора

Для идентификации неисправности, в данном методе используются две сверточные нейронные сети LeNet: первая сеть отвечает за идентификацию неисправностей по импедансной характеристике, а вторая – по фазо-частотной. Обучение нейронных сетей проводилось на изображениях, разбитых на три класса:

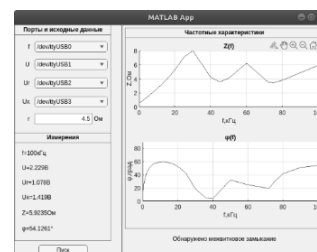
- класс 0 – нормальное состояние;
- класс 1 – межвитковое короткое замыкание;
- класс 2 – межфазное замыкание.

Каждая из нейронных сетей на выходе выдает номер одного из классов. После обработки изображений нейронными сетями, происходит окончательный анализ, который указывает вид неисправности.

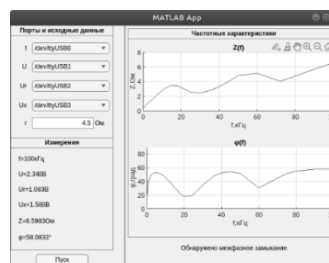
На основе данного метода было разработано программное обеспечение, позволяющее своевременно обнаружить неисправность в трансформаторе (рисунок 2).



а



б



в

Рисунок 2 – Результат работы программы при нормальном состоянии (а), межвитковом коротком замыкании (б) и межфазном замыкании (в)

Данное программно-аппаратное обеспечение было успешно испытано в Белорусском государственном университете транспорта, на трансформаторе ТМ-50/6.

Литература

1. Mahmoudi, N. Experiences with transformer diagnosis by DGA: case studies / N. Mahmoudi, M. H. Samimi, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2019. – Vol. 13, №. 23. – P. 5431–5439.
2. Behjat, V. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonpara-

metric statistical methods / V. Behjat, M. Mahvi, E. Rahimpour // 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2015. – P. 142–148.

3. Samimi, M. H. Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response / M. H. Samimi, S. Tenbohlen, A. A. S. Akmal, H. Mohseni // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2017. – Vol. 11, №. 1. – P. 218–227.

4. Громыко, И. Л. Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трехфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167.

УДК 53.087.92

ПЕЛЛИСТОРЫ НА ПЛАТФОРМАХ ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Денисюк С. В., Куданович О. Н., Андрухович И. М., Спицкий С. И.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены пеллисторы на платформе из тонкопленочного анодного оксида алюминия с токопроводящими пленочными элементами, выполненными из каталитически активных металлов и сплавов, и пленочным катализатором на основе нитрата алюминия и платино-палладиевой смеси, нанесенным на поверхность рабочей зоны. Использование подложек из анодного оксида алюминия позволяет получать пеллисторы с изолированной рабочей зоной, предотвращающей утечку тепла по подложке и обеспечивающей высокую термомеханическую прочность пеллистора.

Ключевые слова: пеллистор, пленка, катализатор, 3D-печать, анодный оксид алюминия

PELLISTORS BASED ON ANODIC ALUMINA PLATFORM

Dzenisiuk S. V., Kudanovich A. M., Andrukhovich I. M., Spitski S. I.

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus

Abstract. The paper discusses pellistors made on a thin-film aluminium oxide anode platform with conductive film elements made of catalytically active metals and alloys, and a film catalyst based on aluminium nitrate and a platinum-palladium mixture applied to the surface of the working area. The use of anodic aluminum oxide substrates allows the production of pellistors with an isolated working area, which prevents heat leakage through the substrate and ensures high thermomechanical strength of the pellistor.

Keywords: pellistor, film, catalyst, 3D-printing, anodic alumina.

Адрес для переписки: Денисюк С. В., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: denisuc@oelt.basnet.by

Термокаталитические сенсоры (пеллисторы) используются для детектирования горючих газов более чем 50 лет [1]. Впервые они были применены в шахтах для детектирования метана. Отличительными особенностями таких устройств являются простота и относительная стабильность параметров. Чувствительный элемент таких приборов представляет собой миниатюрный микрокалориметр, включающий металлический терморезистор (как правило, в качестве материала используется платина в виде проволоки) со сформированным на нем носителем (чаще всего из оксида алюминия), в поверхностном слое которого распределен катализатор для снижения температуры термокаталитической реакции на поверхности рабочей области датчика, что снижает уровень энергопотребления.

Дальнейшего уменьшения энергопотребления можно достичь при тонкопленочном исполнении пеллистора. В настоящей работе рассмотрен вариант возможного такого исполнения.

Изготовление образцов пеллисторов состоит из нескольких основных операций: получение

подложки с высокой химической и термической стабильностью, нанесение пленочных элементов пеллистора, получение активного слоя, на котором может происходить термокаталитическая реакция, изготовление корпуса, монтаж подложки с нанесенными функциональными элементами.

Изготовление подложек начинается с проката алюминиевых пластин до фольги требуемой толщины (около 100 микрон). Затем пластины алюминия проходят процессы рихтовки, очистки и полировки для придания плоскостности и удаления всех примесей, которые могли образоваться на поверхности заготовок. После этого алюминий анодируется до требуемой толщины (40 микрон). Методами фотолитографии и локального травления на поверхности анодного оксида алюминия формируется заданная топология подложек пеллистора. Особенностью разработанной конструкции является наличие изолированной рабочей области, на которой происходит термокаталитическая реакция. Затем с использованием жидкостного травления эти подложки отделяются от алюминиевой основы. На

следующем этапе происходит термическая обработка подложек с целью получения фазы, которая будет устойчива при рабочих температурах сенсора. Наиболее предпочтительной для построения сенсора пеллисторного типа является γ – фаза, которая стабильна при температурах до более 850 °С, и обладает высокой химической стойкостью [2, 3]. Формирование пленочных элементов (нагревательный элемент, токоведущие дорожки и контактные площадки) происходит с использованием ионно-плазменного распыления мишеней из платины с использованием биметаллических масок, которые обеспечивают соответствующую топологию сенсора [4]. Особенностью формирования платиновых пленок на поверхности анодного оксида алюминия является использование переходных тонкопленочных материалов на основе циркония или тантала. Такой подход обеспечивает хорошую адгезию нагревательного элемента к подложке из Al_2O_3 в широком диапазоне температур.

Предложена конструкция корпуса, состоящая из ножки корпуса, защитного колпачка и электрических проволочных выводов. Для свободного прохождения газов к поверхности чувствительного элемента в корпусе предусмотрено сквозное отверстие. В качестве метода формирования элементов корпуса использовали аддитивный метод формирования элементов приборостроения – трехмерную печать (3D печать). Это позволило снизить вес и стоимость корпуса за счет использования дешевых материалов из пластика. Также такой подход позволяет легко масштабировать производство корпуса.

В качестве материала корпуса пеллистора использовали пластик PETG, являющийся разновидностью хорошо известного материала PET (полиэтилена). Такое соединение имеет химический состав с полимерными нитями из полиэтилентерефталат-гликоля ($C_{10}H_8O_4$) $\times$ n и отличается высокой стойкостью к кислотам и щелочам. Повышенное содержание гликоля придает полимеру высокую механическую прочность.

Корпуса и защитные колпачки для сенсоров печатали при температуре 235 °С с использованием 3D принтера Flying Bear Ghost 5.

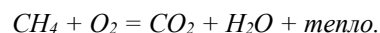


Рисунок 1 – Смонтированный пеллистор в корпусе из PETG

Штыревые вводы для монтажа пеллистора в корпусе выполнены из сплава платинит, состоящего из элементов: Ni (42...46 %); C (0,15 %); остальное Fe , и закреплены в корпусе с помощью эпоксидной смолы. Выбор такого материала обусловлен тем, что он имеет сходный с платиной коэффициент термического расширения. Подложка пеллистора со сформированной тонкопленочной структурой монтировалась в корпусе на штыревых выводах при помощи пайки. Соосные с выводами ножки корпуса отверстия обеспечивают относительно простую сборку прибора. Сформированный сенсор помещается на выводы до упора на основание корпуса, и затем контактные площадки соединяются со штыревыми выводами оловянным припоем. Соотношения между диаметром штыревых выводов и отверстий таковы, что при пайке припоем, с одной стороны, обеспечивается его протекание и соединение с площадкой на противоположной поверхности сенсора. Тем самым создается надежный контакт с токоведущими дорожками и жесткое закрепление датчика на корпусе. Внешний вид помещенного в корпус пеллистора приведен на рисунке 1.

Далее после сборки пеллистора в корпус получали каталитически активный слой. Платина, из которой изготовлен нагреватель пеллистора, является катализатором термического окисления метана. Однако тонкие пленки более склонны к отравлению (потери каталитических свойств), чем массивные материалы.

Поэтому для улучшения рабочих характеристик пеллисторов для детектирования метана дополнительно использовали в качестве катализатора композиционный материал на основе нитрата алюминия и платино-палладиевой смеси. Такое соединение наносили на сторону, противоположную той, на которой сформирован нагреватель пеллистора. Путем пропускания тока через нагреватель достигали температуры около 650 °С, при которой окончательно формировали катализатор. При рабочих температурах чувствительного элемента (200–500 °С) на катализаторе протекает экзотермическая реакция окисления детектируемого газа, приводящая к увеличению сопротивления терморезистора, которое преобразуется в электрический сигнал. В случае метана на рабочей области пеллистора может происходить экзотермическая окислительная реакция:



Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T24КИ-013).

Литература

1. International sensor technology: [сайт]. – 2005. – URL: <http://www.intlsensor.com/technologies.html> (date of access: 15.05.2005).

2. New and modified anodic alumina membranes Part I. Thermotreatment of anodic alumina membranes / P. P. Mardilovich [et al.] // Journal of Membrane Science. – 1995. – Vol. 98, iss. 1–2. – P. 131–142.

3. Gasenkova, I. V. Effect of annealing on the phase composition and morphology of Al₂O₃ formed in a complex electrolyte / I. V. Gasenkova, E. V. Ostapenko //

J. Surf. Inv. X-ray, Synchr. Neutr. Techn. – 2013. – № 7. – P. 536–541.

4. Мухуров, Н. И. Устройства микромеханики и микросенсоры на нанопористом оксиде алюминия / Н. И. Мухуров, Г. И. Ефремов, О. Н. Куданович. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 112 с.

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ СИЛИЦИДОВ NiPt(V)

Довгаль М. И.^{1,3}, Щербаклова Е. Н.¹, Лапицкая В. А.^{1,2}, Соловьев Я. А.³, Пилипенко В. А.³

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

³ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлены результаты изучения электрофизических характеристик слоев силицидов Pt-Ni, полученных магнетронным осаждением и последующей быстрой термической обработкой.

Ключевые слова: покрытия Pt-Ni, быстрая термическая обработка, электрофизические свойства.

EFFECT OF RAPID HEAT TREATMENT ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NiPt(V) SILICIDE LAYERS

Dovgal M. I.^{1,3}, Sherbakova E. N.¹, Lapitskaya V. A.^{1,2}, Soloviev Ya. A.³, Pilipenko V. A.³

¹Belarusian National Technical University

²A.V. Luikov heat and mass transfer institute of the NAS of Belarus

³JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company
Minsk, Belarus

Abstract. The electrophysical properties of magnetron-sputtered Pt-Ni coatings were analyzed following rapid heat treatment.

Keywords: Pt-Ni coatings, rapid heat treatment, electrical properties.

Адрес для переписки: Довгаль М. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: max_dovgal@mail.ru

Введение. Микроэлектроника, являющаяся фундаментальным направлением современной электронной промышленности, сосредоточена на создании, изготовлении и практическом использовании интегральных схем (ИС) и различной аппаратуры на их базе [1].

Среди ключевых технологий, применяемых для модификации свойств материалов в данной области, выделяется быстрый термический отжиг (БТО). Этот метод обеспечивает возможность целенаправленного улучшения критически важных характеристик, таких как электропроводность, механическая твердость и коррозионная стойкость [2].

Широкое применение тонких пленок, прошедших БТО, охватывает полупроводниковое производство, авиацию и космическую отрасль.

Методы и материалы. В качестве объектов исследования выступили тонкие пленки системы Pt-Ni, прошедшие процедуру быстрого термического отжига (БТО).

Технологический процесс получения образцов включал следующие стадии. На первом этапе на подготовленные кремниевые подложки методом магнетронного распыления (катодного распы-

ления) был нанесен нанокompозитный слой Ni-Pt-V номинальной толщиной 40 нм.

Для формирования покрытия использовалась мишень из тройного сплава состава Ni (77 мас. %) – Pt (18 мас. %) – V (5 мас. %). Осаждение проводилось в камере с контролируемой аргонной атмосферой (уровень чистоты газа 99,993 %) при рабочем давлении 0,8 Па. Эксперименты были выполнены на установке 01НИ-7-015. Режимы разряда: мощность – 1,0 кВт, что соответствовало плотности мощности порядка 2,7 Вт/см² при напряжении смещения 300 В.

В работе использовались подложки, представляющие собой многослойные структуры на базе монокристаллического кремния p-типа проводимости с кристаллографической ориентацией поверхности (111) и низким удельным сопротивлением 0,005 Ом·см.

На данную основу был предварительно нанесен эпитаксиальный слой кремния n-типа, легированного фосфором, толщиной 5 мкм и сопротивлением 0,5 Ом·см.

На следующем этапе образцы подверглись БТО на системе JetFirst 100 (Jipelec Qualiflow,

France) в азотной среде. Отжиг выполнялся в режиме термического баланса в течение 7 секунд; нагрев осуществлялся за счет облучения обратной стороны подложки световым потоком от кварцевых галогенных ламп постоянной мощности. Температурный режим на лицевой поверхности образцов контролировался с точностью $\pm 0,5$ °C и варьировался в интервале от 350 до 500 °C.

Удельное сопротивление измеряли с использованием прецизионного измерительного комплекса B1500 компании Agilent (США), оснащенного зондовой станцией Summit 11000 AP от Cascade, которая позволяет проводить измерения параметров полупроводниковых структур на пластине.

Высоту барьера Шоттки рассчитывали по вольтамперной характеристике (ВАХ) методом экспоненциальной аппроксимации начального участка прямой ВАХ диода Шоттки с последующим вычислением по формуле [3].

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 показана зависимость удельного сопротивления пленок Pt-Ni от температуры быстрого термического отжига (БТО).

При БТО при температуре 200 °C для пленок Ni-Pt-V наблюдалось существенное уменьшение удельного сопротивления с 85 мкОм·см у исходных образцов до 50 мкОм·см. Напротив, пленки Ni и Pt показывали рост сопротивления, обусловленное процессом перекристаллизации.

Таблица 1 – Зависимость удельного сопротивления пленок от температуры БТО

Температура БТО, °C	Удельное сопротивление, мкОм·см		
	Ni	Pt	Ni-Pt-V
исх. образец	15,0	15,5	85,0
200	27,6	16,2	50,3
250	27,5	20,8	51,3
300	24,3	35,1	45,6
350	16,7	23,1	39,8
400	15,2	25,7	25,9
450	15,7	27,7	23,7
500	16,4	28,0	24,2
550	17,5	28,3	26,0

На первой стадии быстрого термического отжига (200–250 °C) отмечается незначительный рост удельного электрического сопротивления в пленках Pt-Ni-V и Ni (с 50 до 53 и с 26 до 28 мкОм·см соответственно). Данное явление служит индикатором начала фазообразования и повышения степени гомогенности структуры пленок [4, 5].

При дальнейшем нагреве в интервале 300–350 °C зафиксировано снижение сопротивления для всех исследованных пленочных систем. В высокотемпературной области отжига (400–550 °C) для пленок Ni-Pt-V наблюдается плавное увеличение удельного сопротивления от 26 до 28 мкОм·см.

Этот рост обусловлен утолщением межзеренных границ в структуре Pt-Ni, что приводит к усилению рассеяния носителей заряда на этих дефектах

кристаллической решетки. Для пленок Ni и Pt также зафиксирован незначительный рост сопротивления.

Анализ данных таблицы 2 демонстрирует различное влияние БТО на высоту барьера Шоттки для трех исследуемых материалов: Ni, Pt и сплава Ni-Pt-V. В то время как барьеры на основе чистых металлов показывают высокую стабильность, барьер сплава Ni-Pt-V претерпевает более существенные изменения, что, по-видимому, указывает на активные структурные преобразования в его приконтактной области.

Таблица 2 – Зависимость высоты барьера Шоттки от температуры БТО

Температура БТО, °C	Высота барьера Шоттки, В		
	Ni	Pt	Ni-Pt-V
400	0,63	0,79	0,66
450	0,64	0,80	0,71
500	0,62	0,80	0,71
550	0,63	0,83	0,64

При температурах БТО до 450 °C отмечается увеличение высоты барьера Шоттки для всех образцов. Для пленок Ni-Pt-V барьер возрастает до 0,71 В, что может свидетельствовать о присутствии фазы Pt-Ni. В диапазоне 450–500 °C наблюдаются наивысшие значения барьера Шоттки: для Ni-Pt-V до 0,71 В, для Pt – до 0,8 В. В то же время пленки Ni в этом интервале показывают наименьшие значения.

При повышении температуры БТО до 550 °C высота барьера Шоттки для Ni-Pt-V существенно снижается, что связано, по-видимому, с перестройкой кристаллической структуры, а для пленок чистых металлов – продолжает увеличиваться.

Закключение. Проведенные исследования показали, что с повышением температуры БТО в интервале 400–500 °C удельное сопротивление всех исследуемых пленок возрастает, в то время как изменения высоты барьера Шоттки для Ni, Pt и сплава Ni-Pt-V различны.

Литература

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Мн.: БГУ, 2004. – 531 с.
2. Microstructure and Properties of Thin-Film Submicrostructures Obtained by Rapid Thermal Treatment of Nickel Films on Silicon / V. Lapitskaya, R. Trukhan, T. Kuznetsova [et al.] // Surfaces. – 2024. – Vol. 7, № 2. – P. 196–207.
3. Соловьев, Я. А. Влияние условий быстрой термической обработки на электрофизические свойства тонких пленок хрома на кремнии / Я. А. Соловьев, В. А. Пилипенко // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8. – С. 157–164.
4. Соловьев, Я. А. Особенности фазовых превращений в системе NiVPT Si при ступенчатом стационарном отжиге / Я. А. Соловьев, А. С. Турцевич, А. М. Чапланов [и др.] // Известия РАН. – 2015. – Т. 19, № 11. – С. 1543–1548.
5. Влияние быстрой термической обработки на микроструктуру и свойства слоев силицидов Pt-Ni / В. А. Лапицкая, А. А. Насевич, М. И. Довгаль [и др.] // Приборостроение-2024: мат. 17-й Междунар. науч.-техн. конф. – Мн.: Интегралполиграф, 2024. – С. 403–404.

УДК 621.317.799:551.508

РАДИОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ПАССИВНЫХ СЕНСОРНЫХ ТРАНСПОНДЕРОВ

Здоровцев С. В., Кузнециков А. Ф., Кушнеров Д. П.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки радиочастотной системы сбора данных сенсорных транспондеров в виде пассивных RFID-меток УВЧ диапазона. Описаны принципы построения, структура, особенности функционирования устройства. Рассмотрены пути практического использования разработанной системы для контроля параметров скрытых и труднодоступных объектов.

Ключевые слова: Система радиочастотной идентификации. Пассивные сенсорные транспондеры

RADIO FREQUENCY SYSTEM FOR PASSIVE SENSOR TRANSPONDER DATA COLLECTION

Zdorovtsev S. V., Kuznechikov A. F., Kushnerov D. P.

Open Joint Stock Company MNIPI, Minsk, Belarus

Abstract. The results of the development of a radio frequency system for sensor transponder data collection in the form of passive UHF RFID tags were presented. The principles of construction, the structure, and the system performance features were described. Practical applications of the developed system for the control of parameters of hidden and hard-to-reach objects were considered.

Keywords: Radio frequency identification system. Passive sensor transponders.

Адрес для переписки: Здоровцев С. В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: zgk@mnipi.by

Для контроля состояния скрытых и труднодоступных объектов перспективным является метод радиочастотной идентификации (RFID) с использованием пассивных и полуактивных сенсорных приемо-передающих модулей (транспондеров) УВЧ диапазона.

В работе представлены результаты разработки радиочастотной системы (РЧС) сбора данных сенсорных транспондеров в виде пассивных RFID-меток УВЧ диапазона.

На рисунке 1 показана структурная схема РЧС. В состав РЧС входят:

- комплект сенсорных транспондеров в виде пассивных RFID-меток УВЧ-диапазона;
- радиочастотный считыватель;
- приемо-передающая RFID-антенна УВЧ-диапазона;
- регистратор данных на базе ПК.

В качестве сенсорных элементов использованы пассивные RFID-метки, разработанные компанией FARSENS:

- EVAL01-Hygro-Fenix-RM для измерения абсолютной температуры и относительной влажности среды;
- EVAL01-Fenix-Vortex-RM для измерения абсолютной температуры атмосферного давления;
- EVAL01-Shadow-RM-L108G для измерения освещенности.

Структурная схема меток представлена на рисунке 2.

В состав пассивных RFID-меток FARSENS входят:

- RFID-чип на базе микросхемы Rocky-100, разработанной компанией FARSENS;
- микроконтроллер;
- датчик измеряемых параметров;
- приемо-передающая антенна в виде печатного узла на стеклотекстолитовой подложке.

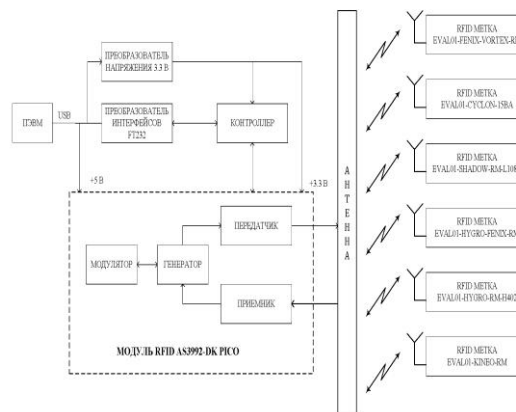


Рисунок 1 – Структурная схема РЧС

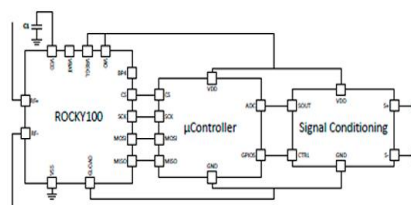


Рисунок 2 – Структурная схема пассивных RFID-меток FARSENS

Радиочастотный считыватель реализован на базе микросхемы AS3992, которая включает в себя полный набор аналоговых и цифровых функций для работы считывателя, включая блок передатчика и приемника с полной поддержкой цифрового протокола ISO18000-6C (EPC Gen2). Для обмена данными с регистратором и обеспечения электропитания радиочастотный считыватель подключается к ПК по шине USB.

В качестве приемо-передающей антенны использована RFID-антенна УВЧ-диапазона CL7205M с техническими параметрами, представленными в таблице 1

Для сбора данных пассивных сенсорных RFID-транспондеров УВЧ диапазона разработано прикладное ПО, обеспечивающее работу радиочастотного считывателя в полосе частот 865–868 МГц. Программа написана на языке программирования C# (CSharp) с использованием библиотеки NetFramework 3.5. Программа работает под управлением операционных систем Windows XP, Windows 7 и выше. Передача данных на ПК выполняется по интерфейсу USB COM.

Таблица 1 – Параметры RFID-антенны CL7205M

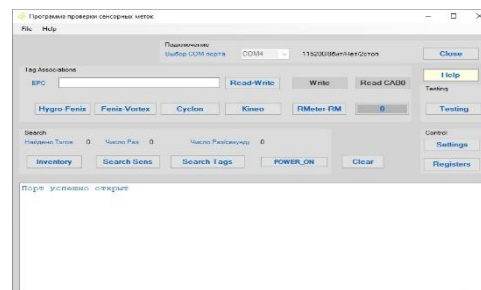
Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот	от 860 до 960 МГц
Поляризация	круговая
Коэффициент усиления	не менее 12 dBi
Тип антенны	RFID
Тип разъема	N-50KFD (тип N)
Рабочая температура	от – 40 до + 80 °С
Класс защиты	IP 66

На рисунке 3 показаны фрагменты информационных окон ПК РЧС при сборе данных пассивных сенсорных RFID-меток в различных режимах работы системы. На первом этапе производится поиск и идентификация сенсорных меток, находящихся в поле зрения РЧС. На втором этапе осуществляется считывание данных обнаруженных сенсоров.

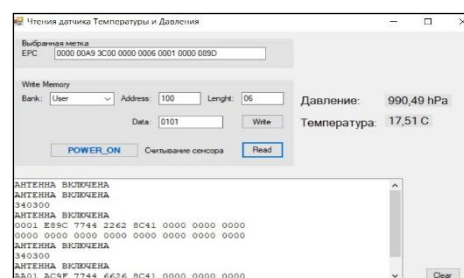
Разработанная РЧС является многоканальной системой, позволяющей производить измерения параметров любого количества пассивных сенсорных RFID-меток, идентифицированных радиочастотным считывателем. При этом имеется возможность регулировки режимов работы системы в части установки количества и длительности радиоимпульсов, предназначенных для активации системы и считывания данных пассивных сенсорных REID-меток.

Метрологические параметры РЧС представлены в таблице 2.

Разработанная система позволяет передавать полученные данные на облачный сервер при подключении ПК к сети Интернет. С этой целью организован сайт <https://www.recontr.com>, на котором может отображаться измерительная информация РЧС в графической и табличной форме с возможностью формирования электронных отчетов.



а



б

Рисунок 3 – Фрагменты информационных окон ПК в режиме выбора сенсора (а) и в режиме измерения атмосферного давления и абсолютной температуры окружающей среды (б)

Таблица 2 – Метрологические параметры РЧС

Параметр	Значение
Диапазон измерения абсолютной температуры	от – 30 до + 85 °С
Диапазон измерения относительной влажности	от 0 до 100 %
Диапазон измерения атмосферного давления	от 260 до 1260 ГПа
Диапазон измерения освещенности	от 0 до 10 000 лк

Разработанная система, может быть, использована для контроля параметров скрытых и труднодоступных объектов. Такие пассивные устройства могут встраиваться в материалы конструкций зданий, сооружений, мостов для проверки допустимых нагрузок; размещаться в критических узлах механизмов и машин для предотвращения аварийных ситуаций; помещаться в герметичные корпуса изделий и контейнеров для контроля их функционирования в жестких условиях эксплуатации.

УДК 621.3.049.77: 681.586

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Здоровцев С. В., Кушнеров Д. П., Шевченко А. В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки беспроводной системы дистанционного контроля положения технических объектов. Система обеспечивает измерение параметров линейного и углового перемещения технических объектов в реальном времени и передачу данных на базовую станцию и в сеть Интернет по беспроводным каналам радиосвязи.

Ключевые слова: Контроль положения технических объектов. Беспроводная передача данных.

REMOTE TECHNICAL FACILITIES' LOCATION CONTROL SYSTEM

Zdorovtsev S. V., Kushnerov D. P., Shevchenko A. V.

Open Joint Stock Company MNIPI, Minsk, Belarus

Abstract. The results of the development of a wireless remote technical facilities' location control system were presented. The system provides real-time measurement of the parameters of linear and angular movement of technical objects and data transmission to the base station and the Internet via wireless radio communication channels.

Keywords: Technical facilities' location control. Wireless data transmission.

Адрес для переписки: Здоровцев С.В., ул.Я.Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: zgk@mnipi.by

Техническими объектами являются сборочные единицы, детали, компоненты, устройства, оборудование различного функционального назначения, элементы зданий и сооружений. Контроль положения технических объектов, в том числе подвижных, предусматривает совокупность аппаратно-программных средств, включающих датчики положения и устройства передачи данных о состоянии объектов.

В работе представлены результаты разработки беспроводной системы дистанционного контроля положения подвижных технических объектов (БСК) при их линейном и угловом перемещении.

В состав БСК входят:

- комплект беспроводных функциональных электронных модулей (ФЭМ), включающие сенсорные блоки датчиками линейных и угловых перемещений, подключаемые к блокам регистрации данных;
- радиомодем беспроводного соединения модулей с базовой станцией локальной сенсорной сети;
- ПК базовой станции;
- удаленный сервер глобальной сенсорной сети;
- регистраторы данных пользователей (ПК, планшет, смартфон);
- программное обеспечение (ПО) для работы в локальной и глобальной сенсорной сети через Интернет.

Структурная схема ФЭМ представлена на рисунке 1. В качестве датчика линейных перемещений в ФЭМ использован модуль лазерного дальномера M701A с источником излучения на твердотельном лазере с длиной волны 635 нм [1]. Диапазон измерения линейных перемещений составляет 0,03 – 40 м, точность измерения $\pm 3,0$ мм.

В качестве датчика угловых перемещений в ФЭМ использован оптический инкрементальный энкодер ENS1J-B28-L00256L,

обеспечивающий измерение угла поворота от 0 до 360 град. и угловой скорости до 3000 об/мин [2].

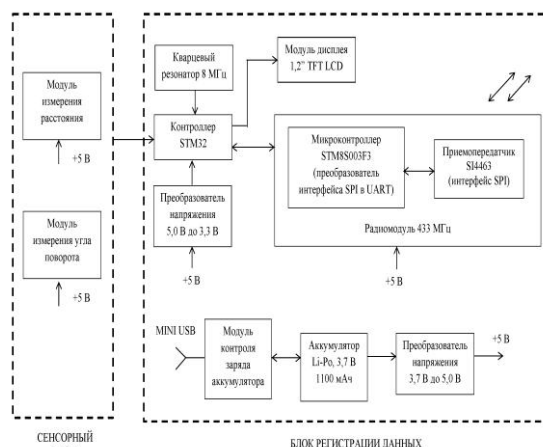


Рисунок 1 – Структурная схема ФЭМ БСК

Обработка измерительной информации осуществляется микроконтроллером STM32F103C8T6 с процессором Cortex-M3, к которому подключаются сенсорные блоки по шине I2C, являющейся одной из модификаций последовательных протоколов обмена данными.

Для беспроводной передачи измерительной информации на удаленный ПК в ФЭМ введен модуль приемопередатчика HC-12 на базе микросхемы SI4463.

На рисунках 2, 3 представлены ФЭМ БСК для контроля линейных и угловых перемещений технических объектов.

Прием измерительной информации осуществляется с помощью блока радиомодема, включающего модуль приемопередатчика HC-12 и конвертер USB-TTL на базе микросхемы SILABS

CP2102 DCL00X 1612, что дает возможность передачи измерительной информации на ПК базовой станции за счет преобразования интерфейса UART в USB. Для увеличения дальности приема-передачи данных использована внешняя антенна ANT 433 ESG-433-01 R/A SMA-M / 433МГц.



Рисунок 2 – Фото ФЭМ БСК для контроля линейных перемещений



Рисунок 3 – Фото ФЭМ БСК для контроля угловых перемещений

Измерительная информация, поступающая на ПК, отображается на экране в виде числовых значений и в виде графиков изменения измеренных значений с течением времени (рисунки 4,5).

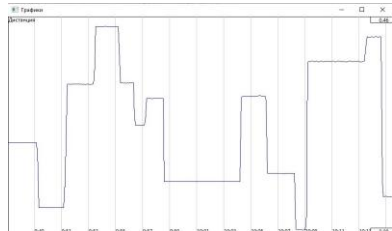


Рисунок 4 – Информационное окно ПК при измерении линейных перемещений



Рисунок 5 – Информационное окно ПК при измерении угловых перемещений

Разработанная система позволяет передавать полученные данные на облачный сервер при подключении ПК базовой станции к сети Интернет. С этой целью организован сайт www.gecontr.com, на котором отображается измерительная информация БСК в графической и табличной форме с возможностью формирования электронных отчетов. Доступ к базам данных пользователей на сервере осуществляется через соответствующие пароли, предоставляемые разработчиком БСК.

Области использования БСК:

- геодезический мониторинг при использовании тахеометров и нивелиров для точных измерений;
- сканирование при создании трехмерных моделей для контроля текущего состояния и сравнения с проектными данными;
- нивелирование при измерении высотных отметок для контроля осадок фундаментов;
- радары и лидары для беспилотных систем определения расстояния до объектов и скорости.

Литература

1. Модуль лазерного дальномера 701A // JRT-measure: [сайт]. – URL: <https://ru.jrt-measure.com/laser-distance-meter-module/52424365.html> (дата обращения: 20.02.2025).
2. ENS1J-B28-L00256L инкрементный энкодер // Components.ru: [сайт]. – URL: <https://components.ru/product/9358269/> (дата обращения: 20.02.2025).

УДК 621.3.049.77: 681.586

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Здоровцев С. В., Кушнеров Д. П., Шевченко А. В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты разработки беспроводной системы мониторинга состояния окружающей среды. Система обеспечивает измерение параметров окружающей среды (абсолютная температура, относительная влажность, атмосферное давление, освещенность) в реальном времени и передачу данных на базовую станцию и в сеть Интернет по беспроводным каналам радиосвязи.

Ключевые слова: мониторинг состояния окружающей среды. Беспроводная передача данных.

WIRELESS ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM

Zdorovtsev S. V., Kushnerov D. P., Shevchenko A. V.

Open Joint Stock Company MNIPI, Minsk, Belarus

Abstract. The results of the development of a wireless environmental monitoring system were presented. The system provides real-time measurement of environmental parameters (absolute temperature, relative humidity, atmospheric pressure, illumination) and data transmission to the base station and the Internet via wireless radio communication channels.

Keywords: environmental monitoring. Wireless data transmission.

Адрес для переписки: Здоровцев С. В., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: zgk@mnipi.by

Мониторинг окружающей среды является частью экологического контроля за состоянием и уровнем загрязнения природы, который выполняется с использованием систем различного уровня. В состав мониторинговых систем входит ряд аппаратно-программных средств контроля параметров окружающей среды [1, 2].

В работе представлены результаты разработки беспроводной системы мониторинга параметров окружающей среды (БСМ), обеспечивающей измерение параметров окружающей среды (абсолютная температура, относительная влажность, точка росы, атмосферное давление, освещенность) в реальном времени (онлайн) и передачу данных на базовую станцию и в сеть Интернет по беспроводным каналам радиосвязи.

Схема организации БСМ представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема организации БСМ

В состав БСМ входят;

- комплект беспроводных функциональных электронных модулей (ФЭМ) с подключаемыми датчиками параметров окружающей среды;
- радиомодем беспроводного соединения модулей с базовой станцией локальной сенсорной сети;
- ПК базовой станции;
- удаленный сервер глобальной сенсорной сети;
- регистраторы данных пользователей (ПК, планшет, смартфон);
- программное обеспечение (ПО) для работы в локальной и глобальной сенсорной сети через Интернет. В качестве датчиков параметров окружающей среды используются цифровые сенсорные модули: BMP280 – модуль контроля абсолютной температуры, относительной влажности, атмосферного давления; DH1750 – модуль контроля освещенности.

Структурная схема ФЭМ представлена на рисунке 2.

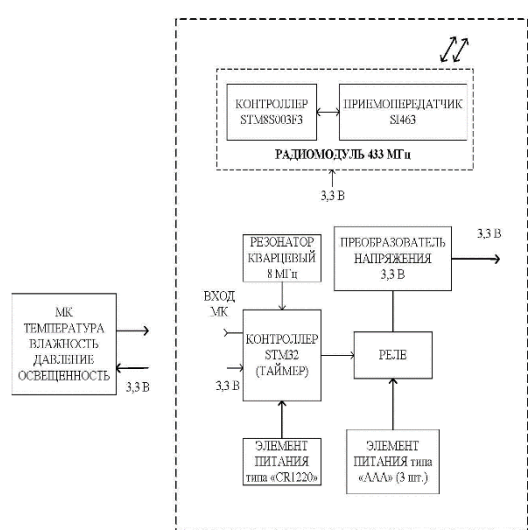


Рисунок 2 – Структурная схема ФЭМ БСМ

Обработка измерительной информации в ФЭМ осуществляется микроконтроллером STM32F103C8T6 с процессором Cortex-M3, к которому подключаются цифровые сенсорные модули по шине I2C. Шина I2C является одной из модификаций последовательных протоколов обмена данными.

Автономное электропитание ФЭМ обеспечивается за счет использования элементов ААА.

Фото ФЭМ БСМ представлен на рисунке 3.

Для беспроводной передачи измерительной информации на удаленный ПК в ФЭМ встроен модуль приемопередатчика HC-12 на базе микросхемы SI4463. Для увеличения дальности передачи данных использована внешняя антенна ANT 433 ESG-433-01 R/A SMA-M / 433МГц, 1dBi, угловая.

Прием измерительной информации осуществляется с помощью блока радиомодема, включающего модуль приемопередатчика HC-12 и конвертер USB-TTL на базе микросхемы SILABS CP2102 DCL00X 1612.

Наличие радиоканала позволяет выполнять дистанционный мониторинг состояния окружающей среды в реальном времени за счет беспроводной передачи данных на базовую станцию, а также трансляции полученных данных в сеть Интернет. Регистрация данных осуществляется в графической и табличной форме с возможностью формирования электронных отчетов. Для удаленного доступа к СДКМ организован облачный сервер по адресу: <https://www.recontr.com>.

Доступ к базам данных пользователей на сервере осуществляется через соответствующие пароли, предоставляемые разработчиком БСМ.



Рисунок 3 – Фото ФЭМ БСМ

БСМ обеспечивает:

- сбор измерительной информации с распределенных функциональных сенсорных модулей;
- передачу данных на базовую станцию по беспроводным каналам радиосвязи;
- обработку, регистрацию, хранение полученных данных в табличном и графическом виде;
- трансляция данных в сеть Интернет и их размещение на выделенном сервере с возможностью доступа к ним пользователей;
- формирование конфигурации системы по требованию потребителя.
- автоматическое формирование электронного журнала учета измеряемых параметров;
- установку пределов измеряемых параметров;
- настройку интервалов считывания данных с функциональных сенсорных модулей.

Основные параметры БСМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры БСМ

Параметр	Значение
Диапазон измерения температуры	от -40 до +85 °С
Диапазон измерения отн. влажности	от 0 до 98 %
Диапазон измерения атм. давления,	от 300 до 1100 гПа
Диапазон измерения освещенности	от 10 до 60 000 лк
Расчет точки росы	есть
Канал связи	радиоканал 433 МГц
Дальность связи	500 м

Преимущества БСМ:

- простая установка и настройка (не требуется прокладки проводов/кабелей);
- предоставление потребителю требуемого ПО и серверной инфраструктуры;
- круглосуточный доступ к данным из любой удаленной точки;
- гибкость и масштабируемость (легко изменить структуру оборудования и пользователей);
- автоматическое формирование таблиц, графиков, отчетов;
- низкая стоимость внедрения и эксплуатации.

Разработанная БСМ может быть использована для контроля и мониторинга окружающей среды в помещениях, складах, хранилищах, на производственных участках, технологических линиях, коммунальных хозяйствах.

Литература

1. Мониторинг окружающей среды // Области экологии: [сайт]. – URL: <https://oblasti-ekologii.ru/ecology/ekologiceskij-risk-kontrol-i-monito> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Системы мониторинга окружающей среды // Лабдепо: [сайт]. – URL: <https://labdepot.ru/oborudovanie/kontrol-parametrov-okruzhayushch> (дата обращения: 20.02.2025).

УДК 519.24

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИСТАНЦИОННОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПО ЛАЗЕРНЫМ СПЕКЛАМ

Иванов В. И.

НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров движения объекта на достоверность результатов вибродиагностики по амплитудно-частотному спектру флуктуаций отраженного лазерного излучения в режиме прямого фотодетектирования сигнала. Получены расчетные соотношения для определения максимально возможных дистанций вибродиагностики с учетом скоростных и угловых параметров движения виброповерхности.

Ключевые слова: лазерная спекл-виброметрия

INFLUENCE OF OBJECT MOVEMENT PARAMETERS ON THE RELIABILITY OF REMOTE VIBRATION DIAGNOSTICS BY LASER SPECLE

Ivanov V.I.

Institute for nuclear problems of Belarusian state university, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of the influence of object motion parameters on the reliability of vibration diagnostics results based on the amplitude-frequency spectrum of reflected laser radiation fluctuations in the direct photodetection mode of the signal. Calculation relationships are obtained for determining the maximum possible vibration diagnostics distances taking into account the speed and angular parameters of the vibration surface motion.

Keywords: aaser speckle vibrometry.

Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: 46vanov.inpr@gmail.com

Интерференционная картина (спекл – поле) лазерного излучения на шероховатой поверхности обусловлена фазовыми соотношениями интерферирующих волн, которые в свою очередь весьма чувствительны к параметрам вибраций данных поверхностей [1, 2]. При этом от частоты колебаний (вибраций) поверхности объекта вполне определенным образом зависит спектр временных флуктуаций интенсивности принимаемого спекл-сигнала $I(t)$ [3, 4], что позволяет дистанционно определять как радиальные, так и тангенциальные микровибрации различных объектов, например, в задачах диагностики и распознавания различных наземных и воздушных объектов по их вибрационным характеристикам [5].

При движении объекта освещенный участок его поверхности кроме колебательных движений (вибраций) может совершать как поступательное движение вдоль оптической оси вибromетра (лазерного луча), так и поперечное движение в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу. Это влияет на динамику спеклов, а, соответственно, изменяет спектр флуктуаций интенсивности регистрируемого сигнала от вибрирующей поверхности и может приводить к большим ошибкам.

При движении поверхности вдоль направления наблюдения интенсивность в некоторой точке спекл-структуры существенно изменяется, когда разность фаз световых волн, рассеянных краями разрешаемого элемента и его центром, достигнет величины 2π . В соответствии с [2] это условие будет выполнено, если объект, за время наблюдения, сместится на расстояние ΔZ , равное:

$$\Delta Z \Delta Z = \sqrt{2l_1 \lambda}, \quad (1)$$

где l_1 – расстояние от объекта до приемной оптической системы (ОС) вибromетра.

Таким образом, с увеличением расстояний до объекта ΔZ также увеличивается. Например, при $l_1 = 1$ км и $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м, $\Delta Z \cong 3$ см. Следовательно, плоскости фотодетектора; $K = 2\pi/\lambda$ – волновое число; q – радиус апертуры ОС; $J_m(\gamma x)$ – функция Бесселя первого рода.

При большой амплитуде угловых колебаний вектора нормали к поверхности объекта $\gamma = 10$

$$\gamma = 2K\rho_0 A_0, \quad (3)$$

где $A_0 = |\nabla f(0)|$ – градиент функции колебания поверхности f в точке наблюдения.

Общий характер уширения сохраняется за исключением некоторых деталей. В частности, ширина компонент с $m \neq 0$ практически не

увеличивается в процессе уменьшения угла φ до нуля и может быть принята равной $\sigma\Delta$.

В пределе при $\vec{v} \rightarrow 0$ правая часть (2) стремится к дельта-функции с коэффициентом G_m [3]

$$G_m = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{(-x^2/2)} J_m^2(\gamma x) dx. \quad (4)$$

Влияние поперечного движения на спектр флуктуаций интенсивности регистрируемого сигнала в определенной степени зависит от угла φ . Если скорость поверхности объекта направлена перпендикулярно к плоскости колебания вектора нормали поверхности, т. е. $\varphi = \pi/2$, то равенство (2) упрощается

$$G_m(\Omega, \varphi)_{\varphi=\pi/2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\Omega}{2\sigma_0}\right)^2} G_m, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = \sigma\sqrt{1 + \Delta^2}$, а величина G_m определяется формулой (4).

В данном случае все спектральные компоненты сигнала G_m имеют гауссовскую форму с параметром σ_0 , характеризующим спектральную ширину компоненты. При $\Delta \ll 1$ ширина компоненты определяется параметром σ , который можно представить в виде

$$\sigma = \frac{KqV}{2l_1 w_0}. \quad (6)$$

Величина параметра σ обратно пропорциональна расстоянию до объекта и частоте акустических колебаний w_0 . Для того, чтобы сигнальный спектр не сильно искажался движением объекта необходимо выполнение условия $\sigma < 1$. Отсюда получаем ограничение на допустимую поперечную скорость объекта относительно оптической оси вибromетра.

$$V < \frac{2l_1 w_0}{Kq} = v_{max}. \quad (7)$$

Из условия (7) видно, что чем ближе к вибromетру находится объект и чем ниже частота колебаний его поверхности, тем меньше должна быть его поперечная скорость для успешного функционирования рассматриваемого метода. Например, при $l_1 = 1$ км; $q = 0,1$ м; $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м; $w_0 = 500$ Гц, из (7) получим $v_{max} = 10$ м/сек.

Оценка (7) справедлива лишь при малости параметра Δ . Если положить параметр расфокусировки $\Psi_1 = 0$, то условие малости параметра Δ запишется в виде:

$$l_1 < \frac{q^2 K}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, при выбранных выше параметрах оптической системы ЛСМД условие (7) применимо для расстояний менее 50 км. В случае

расстояний в 100 и более километров в выражении для σ_0 можно пренебречь единицей под корнем и максимально допустимая скорость объекта принимает вид:

$$V_{max} = qw_0. \quad (9)$$

Для больших расстояний v_{max} не зависит от дальности до объекта и определяется только размером приемной апертуры и частотой вибраций.

В частности, при указанных выше значениях влияние на динамику спеклов продольной составляющей движения поверхности объекта, для больших расстояний наблюдения, пренебрежимо мало.

Более сложным является вопрос исследования влияния поперечного движения объекта со скоростью v на спектр временных флуктуаций интенсивности сигнала в некоторой точке спекл-структуры поля.

Теоретические и экспериментальные исследования, данного вопроса, проведенные для одномодовой вибрации поверхности, показывают, что спектр временных флуктуаций интенсивности фототока сигнала $I(t)$ при наличии поперечного движения освещенной поверхности является непрерывным, а не дискретным, как в случае неподвижной поверхности [4]. Это говорит о том, что функция фототока $I(t)$ уже не обладает свойством строгой периодичности. Движение объекта приводит к уширению отдельных спектральных составляющих $G_m \sigma(w-mw_0)$.

В данном случае параметр G_m это безразмерная величина нормированного квадрата модуля m -той гармоники сигнала. Характер уширения спектральных компонент G_m зависит, как от величины поперечной скорости, так и от ее направления согласно уравнению:

$$G_m = \frac{1}{2\pi\sigma} (1 + \Delta^2 \sin^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{x\sigma\Delta \cos \varphi - \Omega}{2\sigma^2(1 + \Delta^2 \sin^2 \varphi)} \right\} * e^{(-x^2/2)} J_m^2(\gamma x) dx, \quad (2)$$

где $\sigma = \frac{v}{\rho_0 w_0}$; $\Delta = \rho_0^2 \left(\frac{K}{l_1} - \frac{\psi_1}{\rho_0^2} \right)$; φ – угол между направлением вектора скорости V и плоскостью колебания вектора нормали к облученной поверхности; $\Omega = \frac{w}{w_0} - m$ – относительная частота;

$\rho_0 = \frac{l_1 \sqrt{2(1+\psi_1)}}{Kq}$ – параметр, характеризующий линейное разрешение оптической системы (ОС); $\psi_1 = \frac{Kq^2}{2} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} - \frac{1}{F} \right)$ – параметр расфокусировки (при точно сфокусированном лазерном излучении на поверхности объекта $\psi_1 = 0$; l_2 – расстояние от ОС до параметров $v_{max} = 100$ м/с.

Следует отметить, что на больших расстояниях ограничение на максимальную поперечную скорость объекта можно существенно ослабить путем расфокусировки оптической системы. Так как величина зависит от параметра расфокусировки ψ_1 , то при его значении:

$$\psi_1 = \frac{1}{q} \sqrt{\frac{2l_1}{K}} \quad (10)$$

получим $\Delta=0$. Величина v_{max} в этом случае определяется соотношением (7) и может принимать достаточно большие значения.

Эффект уширения спектральных компонент G_m , когда вектор скорости v не ортогонален плоскости колебания вектора нормали к поверхности, качественно отличается от рассмотренного выше случая. Здесь картина уширения различна для компонент с $m=0$ и $m \neq 0$. При малых амплитудах акустических колебаний поверхности ($\gamma = 1$) нулевая компонента спектра по мере уменьшения угла φ от 90° до 0° несколько сужается, сохраняя гауссоподобную форму. Совершенно по-иному меняется форма компонент спектра с $m \neq 0$. При уменьшении угла φ уширение компонент увеличивается, причем функция, описывающая уширение, приобретает двухмодовую форму, т. е. расширение сопровождается расщеплением компоненты на два пика. Степень проявления этого эффекта увеличивается вместе с ростом числа m .

Одновременно с расщеплением у этих компонент наблюдается появление дополнительных пиков меньшей величины, т. е. функция уширения приобретает многомодовый характер. Это приводит к искажению спектра сигнала $I(t)$, а соответственно и к снижению достоверности вибродиагностики.

С физической точки зрения наблюдающийся сложный эффект уширения спектральных компонент, когда вектор поперечной скорости лежит в плоскости колебания вектора нормали, по-видимому, можно объяснить результатом сложения колебательного движения спеклов, вызванного колебанием поверхности, с поступательным движением спекл-структуры в том же направлении, которое связано с движением объекта, как целого.

Из приведенных результатов также следует, что независимо от величины угла φ за оценку степени уширения спектральной компоненты можно принять величину $\sigma'_0 = \sigma \Delta$. Следовательно, выражение (9) позволяет получать оценки максимально допустимой поперечной скорости объекта также и при произвольной ориентации направления вектора скорости.

Литература

1. Франсон, М. Оптика спеклов / М. Франсон. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
2. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
3. Пресняков, Ю. П. Использование спекл-эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности / Ю. П. Пресняков, В. П. Щепинов // Журнал теоретической физики. – 1997. – Т. 67, № 8. – С. 71–75.
4. Иванов, В. И. Теоретические и экспериментальные исследования лазерного спекл-анализа микровибраций и смещений / В. И. Иванов, Н. И. Иванов // Приборостроение-2022: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 106–108.
5. Лазер научится идентифицировать цели // N+1: [сайт]. – 2015. – 23 ноября. – URL: <https://nplus1.ru/news/2015/11/23/laser/> (дата обращения: 21.03.2025).

УДК004.042

МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ

Иванов В. И.

НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен метод одновременного определения высоты и скорости полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА), основанный на анализе временных параметров динамики изменения интенсивности детектируемого оптического потока, обусловленного неоднородной яркостью подстилающей поверхности (ПП). Метод существенно расширяет возможности навигации летательных аппаратов по оптическому потоку, обеспечивает определение высоты и скорости поступательного полета с высоким быстродействием и точностью.

Ключевые слова: автономная навигация БПЛА, навигация по оптическому потоку.

METHOD OF SIMULTANEOUS DETERMINATION OF ALTITUDE AND FLIGHT SPEED OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BY OPTICAL FLOW

Ivanov V. I.

Institute for nuclear problems of Belarusian state university, Minsk, Belarus

Abstract. A method for simultaneously determining the altitude and speed of an unmanned aerial vehicle (UAV) flight is proposed, based on the analysis of time parameters of the dynamics of changes in the intensity of the detected optical flow, caused by the non-uniform brightness of the underlying surface (OS). The method significantly expands the capabilities of aircraft navigation by optical flow, ensures the determination of the altitude and speed of translational flight with high speed and accuracy.

Keywords: autonomous UAV navigation, optical flow navigation.

Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: Ivanov.inp@gmail.com

Метод одновременного определения высоты H и путевой скорости летательного аппарата V_x основан на получении и анализе временных параметров динамики оптического потока, обусловленного изменениями яркости ПП при полете БПЛА над ПП с неоднородной яркостью. Вариации яркости ПП вызваны различной степенью отражения (альбедо) k_0 естественной световой радиации локальными областями ПП [1, 2].

Информация о временных параметрах оптического потока определяется фотодетектированием отраженной световой радиации, получаемой при сканировании ПП по траектории полета БПЛА пространственным «окном» (апертурой) A бортовой оптической системы (ОС).

На борту БПЛА используются две оптические системы ОС1 и ОС2 с разными угловыми полями $\alpha_1 \neq \alpha_2$ и равными углами сканирования (визирования) $\beta_1 = \beta_2$, соответственно. ОС1 и ОС2 установлены вдоль продольной оси ЛА на базовом расстоянии d_0 друг от друга. Каждая из ОС включает объектив и одноэлементный фотодетектор (ФД) – лавинный фотодиод, миниатюрный ФЭУ и т. п.

На рисунке 1 приведена схема метода ($\alpha_1 > \alpha_2$). ПЛА вектора путевой скорости V_x , т. е.

$$B(x') = F \int_{y' - A_x/2}^{y' + A_x/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} L(r) r'(x' - x) dx \right] dy, (1)$$

где $r'(x)$ – весовая функция пространственного «окна».

В данном случае $r'(x) = 1$ при $-A_x/2 \leq x \leq A_x/2$; $r'(x) = 0$ для всех x , не попадающих в интервал $(-A_x/2; A_x/2)$.

В общем случае апертура A определяет площадь S апертуры в предметной плоскости x, y

(на подстилающей поверхности) и является функцией высоты полета БПЛА H , апертурного угла ОС α , и угла сканирования (визирования) β

$$A = f(H, \alpha, \beta). (2)$$

В данном случае угол β отсчитывается от нормали к продольной оси ЛА (горизонтальной строительной плоскости БПЛА) и лежит в плоскости HOX , т. е. $\beta = \beta_x$, рисунок 1. ОС бокового обзора в данном случае не рассматриваем.

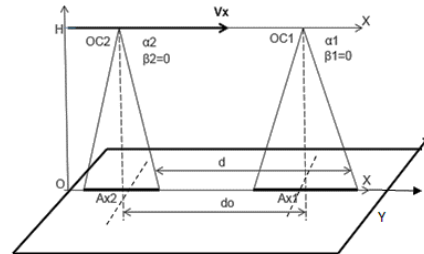


Рисунок 1 – Схема реализации метода на Б

Не нарушая общности обоснования данной методологии дальнейшее рассмотрение проводим для апертуры с использованием прямоугольной вырезающей диафрагмы с размерами $l_x \times l_y$ мм. В этом случае апертура ОС в плоскости ПП также имеет прямоугольную конфигурацию с длиной сторон по координатам x, y A_x и A_y соответственно, которые определяются уравнениями:

$$A_x = H[tg(\beta + \alpha_x/2) - tg(\beta - \alpha_x/2)]; (3)$$

$$A_y = 2H tg \alpha_y/2; (4)$$

$$\alpha_x = 2arctg l_x/2F; (5)$$

$$\alpha_y = 2arctg l_y/2F, (6)$$

где α_x и α_y – апертурные углы по координатам x и y соответственно, определяющие поле зрения ОС; F – фокусное расстояние объектива ОС, мм.

Площадь аперттуры прямоугольной конфигурации

$$A = A_x A_y = H^2 \{ [tg(\beta + \alpha_x/2) - tg(\beta - \alpha_x/2)] 2tg\alpha_y/2 \} \quad (7)$$

определяет площадь сканирующего окна (апертуры ОС) в плоскости ПП на высоте полета H .

При $l_x = l_y$ ($\alpha_x = \alpha_y = \alpha$) и угле визирования $\beta = 0^\circ$ (вертикальное сканирование) аперттура ОС имеет форму квадрата с размерами сторон

$$A_x = A_y = 2Htg\alpha/2. \quad (8)$$

При сканировании альbedo ПП может изменяться в широких пределах, например, в видимом диапазоне от $k_0 = 8\%$ (сухая темная почва) до $k_0 = 64\%$ (снег чистый, сухой) [1, 2]. Это определяет динамику изменения сигнала (1), а именно амплитуду и скорость $1/\tau_i$ амплитудной модуляции сигнала, а соответственно и требуемую полосу частот Δf детектируемых сигналов в зависимости от степени неоднородности альbedo ПП, протяженности локальных яркостных полей ПП D_{xi} , аперттуры A и скорости полета V_x .

Параметр τ_i определяет длительность сигнала импульса

$$\tau_i = (D_{xi} + A_x)/V_x = (D_{xi} + 2Htg\alpha/2)/V_x. \quad (9)$$

Глубина амплитудной модуляции сигнала $B(r, t)$ определяется уравнением

$$|m_i| = \frac{|B_{Di} - B_{Di+1}|}{B_{Di} + B_{Di+1}} = \frac{|Ek_{0,Di} - Ek_{0,Di+1}|}{Ek_{0,Di} + Ek_{0,Di+1}} = \frac{|k_{0,Di} - k_{0,Di+1}|}{k_{0,Di} + k_{0,Di+1}}, \quad (10)$$

где $\Delta B_{Di,Di+1} = |B_{Di} - B_{Di+1}|$ – дифференциальная разность сигналов B_{Di} и B_{Di+1} от двух смежных областей ПП D_i и D_{i+1} с разными альbedo $k_{0,Di}$, $k_{0,Di+1}$ соответственно; E – освещенность ПП.

Увеличение дифференциальной разности сигналов $\Delta B_{Di,Di+1}$, а соответственно и глубины модуляции (10), увеличивают соотношение «сигнал/шум», что в данном случае углы визирования ОС1 и ОС2 равны, а их оптические оси совпадают с нормалью к горизонтальной плоскости ЛА, т.е. $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. Соответственно при горизонтальном полете БПЛА относительно ПП сканирование осуществляется перпендикулярно ПП (в надиr). Выходной сигнал ОС пропорционален энергетической яркости ПП

$$B(r) = F \iint_A L(r) dr, \quad (11)$$

где F – оператор приема и фотодетектирования; $L(r)$ – функция распределения яркости подстилающей поверхности (яркостная сигнатура ПП); $r = x, y$ – вектор пространственных координат на плоскости x, y ПП.

Так, например, при прямоугольной приемной апертуре ОС площадью A , в дальнейшем просто

апертурой A , в виде прямоугольника со сторонами A_x и A_y можно записать

$$B(r) = F \int_{x'-A_x/2}^{x'+A_x/2} \int_{y'-A_y/2}^{y'+A_y/2} L(r) dx dy. \quad (12)$$

При полете БПЛА скорость сканирования определяется путевой (земной) скоростью ЛА, а направление сканирования ПП совпадает с направлением вектора путевой скорости V_x (ось X). В общем виде путевая скорость V_x рассматривается как проекция вектора воздушной скорости БПЛА в пространстве V_θ на ПП и определяется уравнением

$$V_x = V_\theta \cos\theta, \quad (13)$$

где θ – угол вектора воздушной скорости полета ЛА по отношению к горизонтальной плоскости ПП; при горизонтальном полете $\theta = 0$; $V_x = V_\theta$.

При этом координата X принимает непрерывный ряд значений x' , а координата Y остается неизменной. Соответственно выходной сигнал фотодетектора ОС определяется сверткой пространственного «окна» (аперттуры A) и функции распределения яркости $L(r)$ ПП в направлении конечного итога определяется яркостным контрастом смежных областей ПП. При малом контрасте (малой глубине модуляции) сигнала определяющим является мощность принимаемого сигнала [3, 4].

Согласно (9) разность длительностей сигнальных импульсов $\Delta\tau$ определяется уравнением

$$\Delta\tau = |\tau_{i1} - \tau_{i2}| = \frac{|(D_i + A_{x1}) - (D_i + A_{x2})|}{V_x} = |A_{x2} - A_{x1}|/V_x = |\Delta A_x|/V_x, \quad (14)$$

где A_{x1} и A_{x2} – протяженность апертур ОС1 и ОС2 по оси x (по направлению вектора скорости V_x). При вертикальном сканировании ПП $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. Соответственно

$$k_1 = tg\alpha_1/2; \quad (15)$$

$$k_2 = tg\alpha_2/2; \quad (16)$$

$$A_{x1} = 2Htg\alpha_1/2 = 2Hk_1; \quad (17)$$

$$A_{x2} = 2Htg\alpha_2/2 = 2Hk_2. \quad (18)$$

Полагаем, что $\alpha_1 > \alpha_2$, при этом

$$\Delta A_x = A_{x1} - A_{x2} = 2H(k_1 - k_2). \quad (19)$$

В этой связи уравнение (14) примет вид

$$\Delta\tau = 2H(k_1 - k_2)/V_x. \quad (20)$$

Из (20) получаем

$$V_x = 2H(k_1 - k_2)/\Delta\tau. \quad (21)$$

Время задержки (запаздывания) τ_d импульса τ_{i1} относительно импульса τ_{i2} определяется уравнением:

$$\tau_d = d/V_x = (d_0 + \Delta d)/V_x, \quad (22)$$

где d – расстояние между передними «фронтами» апертур ОС1 и ОС2; d_0 – базовое расстояние установки ОС1 и ОС2 на ЛА (рисунок 1).

$$\Delta d = H(k_1 - k_2) = 0,5\Delta A_x. \quad (23)$$

Соответственно (22) примет вид

$$\tau_d = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/V_x. \quad (24)$$

Из (21) имеем:

$$V_x = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d. \quad (25)$$

Уравнения (21) и (25) инвариантны друг к другу, т. е.

$$2H(k_1 - k_2)/\Delta\tau = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d \quad (26)$$

Из (26) получаем уравнение для определения высоты полета H виде

$$H = d_0\Delta\tau / [(2\tau_d - \Delta\tau)(k_1 - k_2)]. \quad (27)$$

Уравнение для определения скорости полета V_x получено из (25) с учетом (27)

$$V_x = 2d_0 / (2\tau_d - \Delta\tau). \quad (28)$$

Как следует из уравнений (27, 28) метод обеспечивает одновременное определение высоты H и путевой скорости V_x БПЛА при полете над ПП с неоднородной яркостной сигнатурой. Особые преимущества метода проявляются в условиях квазигоризонтальных маловысотных полетов

со скоростью до 300 км/ч в диапазоне высот до 250–300 м, что актуально для контроля сближения БПЛА с заданными объектами на ПП, автоматизированной посадки, осуществления полетов с огибанием рельефаместности на предельно малых высотах до $0,2 \div 0,5$ м [4].

Литература

1. Гурлев, Д. С. Справочник по фотографии (фото-съемка) / Д. С. Гурлев. – Киев: Техника, 1989. – 305 с.
2. Тимофеев, Ю. М. Основы теоретической атмосферной оптики / Ю. М. Тимофеев, А. В. Васильев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2007. – 338 с.
3. Иванов, В. И. Методология и алгоритмы получения 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения / В. И. Иванов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 386–396.
4. Иванов, В. И. Метод определения высоты и скорости полета беспилотного летательного аппарата по яркостной сигнатуре подстилающей поверхности / В. И. Иванов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2025. – Т. 92, № 5. – С. 607–617.

УДК 621.313

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Лычковский В. А., Кротова А. С., Леонович П. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов является актуальной с самого зарождения станко- и приборостроения. Целью данной работы было разработка метода, построение алгоритма и изготовление на их основе прибора, который сможет на основе спектральных составляющих тока, протекающего в обмотках электрической машины, работающей в режиме «холостого хода» контролировать его состояние с возможностью своевременного выявления дефектообразования.

Ключевые слова: диагностика электрических машин, методы оценки состояния электрических машин, спектральный состав тока холостого хода, сопротивление межвитковой изоляции обмоток.

USING NO-LOAD CURRENT TO ASSESS THE CONDITION OF ELECTRIC MACHINE WINDINGS Isaev A. V., Sukhodolov Yu. V., Lychkovsky V. A., Krotova A. S., Leonovich P. D.

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Abstract. The problem of assessing the performance of electromechanical drives has been relevant since the very inception of machine-tool and instrument-making. The purpose of this work was to develop a method, build an algorithm and manufacture a device based on them that will be able to monitor the state of an electric machine with the ability to promptly detect defects based on the spectral components of the current flowing in the windings of an electric machine operating in the "idle" mode.

Keywords: diagnostics of electrical machines, methods for assessing the condition of electrical machines, spectral composition of no-load current, resistance of interturn insulation of windings.

*Адрес для переписки: Исаев А. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by*

Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов была актуальна с самого зарождения станко- и приборостроения. При этом данная проблема до конца не решена и в настоящее время. А с учетом увеличения требований к такому оборудованию, существенному повышению эксплуатационных характеристик, эта проблема стала еще более критичной. В настоящее время разработано большое количество методов, в той или иной

мере позволяющие оценить состояние электрических цепей электроприводов, но все они мало пригодны для использования в реальных условиях [1, 2]. Да и фиксируют они проблему уже на конечных стадиях дефектообразования, когда говорить о работоспособности, а тем более об исправности такого диагностируемого оборудования не приходится. Поэтому работы по разработкам методов и алгоритмов контроля состояния электрических машин,

можно сказать, не прекращаются ни на минуту. Одним из способов решить поставленную задачу является метод контроля и анализа спектральных составляющих тока холостого хода при работе электрических машин без наличия выходной нагрузки [3]. Этот метод не является новым. И особенности изменения параметров тока, протекающего в обмотках, например трехфазных двигателей, в зависимости от состояния самих обмоток исследовались достаточно серьезно. Однако все исследования остановились только на факте, что «да», влияют. Но как, по каким закономерностям и при каких условиях, а самое главное – как использовать это для диагностики электрооборудования, ответа так и не было дано. Поэтому целью данной исследовательской работы было разработка метода, построение алгоритма и изготовление на их основе прибора, который сможет контролировать состояние электрических машин непосредственно в рабочих циклах их эксплуатации с возможностью своевременного выявления дефектообразования [4]. На рисунке 1 приложены осциллограммы тока работающего двигателя при равных условиях, но на в первом случае с исправными обмотками, а во втором при наличии дефекта в межвитковой изоляции на уровне 100 Ом (т.е. когда двигатель еще в какой-то мере работоспособен, но уже не исправен).

В этом случае даже «на глаз» отслеживается отличие зависимостей. Однако, оценка спектральных составляющих представленных кривых показывает на сколько существенны эти отличия (рисунок 2). При этом, как показали эксперименты, наиболее информативными параметрами могут являться уровень (т. е. суммарная амплитуда) высших спектральных составляющих (т. е. результирующей кривой тока холостого хода, полученной путем сложения высших спектральных составляющих) и изменение (сдвиг) фазы первой спектральной составляющей относительно входного напряжения и (или) суммы высших спектральных составляющих.

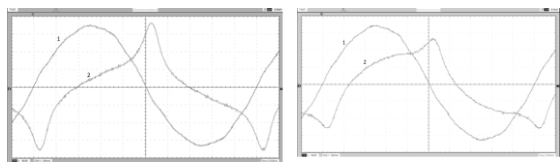
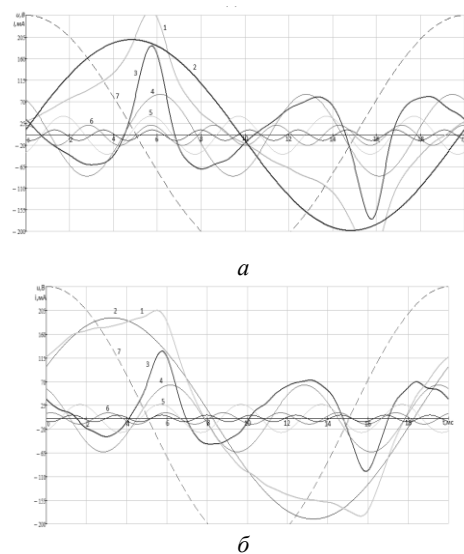


Рисунок 1 – Осциллограммы тока холостого хода при различных состояниях обмотки

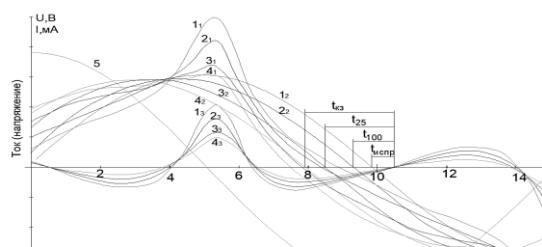
Однако изменения амплитуды характеризуются невысокой точностью измерений при стандартных, т. е. производственных условиях. Это связано как с нестабильностью параметров исходного сигнала (нестабильность сетевого напряжения по амплитуде, наличие высших гармоник и т. д.), так и с сильным влиянием на параметры самого

измерительного сигнала помех от диагностируемого мощного электромагнитного оборудования.



1 – общая кривая тока холостого тока; 2 – кривая первой гармоники; 3 – суммарная кривая тока высших гармоник; 4 – кривая третьей гармоники; 5 – кривая пятой гармоники; 6 – кривая седьмой гармоники; 7 – кривая фазного напряжения; а – исправное состояние обмотки; б – при витковом замыкании через сопротивление 10 Ом

Рисунок 2 – Спектральный состав тока холостого тока



x^1 – суммарная кривая тока XX; x^2 – кривая первой спектральной составляющей тока XX; x^3 – кривая суммы высших спектральных составляющих тока XX; 1 – исправного; 2 – при межвитковом сопротивлении 100 Ом; 3 – при межвитковом сопротивлении 25 Ом; 4 – с КЗ витками

Рисунок 3 – Кривые тока XX обмоток исследуемого электродвигателя

Поэтому, как наиболее оптимальным измерительным параметром, было выбрано изменение фазы. Дальнейшая исследования и анализ полученных кривых тока холостого хода показали, что наиболее информативным параметром является взаимное расположение на временной оси точек перехода через ноль первой спектральной составляющей и точек перехода через ноль результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих. При этом наиболее целесообразно использовать для анализа временной интервал между переходом первой спектральной составляющей из положительной в отрицательную

область, и следующим после зафиксированной первой характерной точки переходом через ноль из отрицательной в положительную результирующей кривой, полученной путем сложения высших спектральных составляющих (т.е. ближайшая к $t = T/2$) (рисунок 3).

Литература

1. Современные методы оценки состояния обмоток электрических машин / Ю. В. Суходолов [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2025. – № 2. – С. 49–59.

2. Дайнеко, В. А. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения / В. А. Дайнеко, Ж. Г. Юрковец // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 22–25.

3. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: введ. 11.01.2016. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

4. Исаев, А. В. Определение дефектов обмоток электрических машин по параметрам спектра тока холостого хода / А. В. Исаев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 17–21.

УДК 681.783

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОЭФФЕКТА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ И РАССТОЯНИЯ ДО НИХ

Калинов В. С.¹, Козлов В. Л.², Яковлев Д. Л.¹

¹ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

²Факультет радиофизики и компьютерных технологий БГУ

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются теоретические принципы и практическая реализация системы машинного зрения на базе цифровой стереокамеры, предназначенной для дистанционного измерения пространственных координат и размеров предметов, не требующая применения мерных объектов в поле зрения. Приведена методика калибровки системы и данные по точности измерений.

Ключевые слова: машинное зрение, стереоизображение, диспаратность, цифровая фотосъемка, корреляционная обработка.

PRACTICAL APPLICATION OF THE STEREO EFFECT FOR REMOTE DETERMINATION OF THE SIZE OF OBJECTS AND THE DISTANCE TO THEM

Kalinov V. S.¹, Kozlov V. L.², Yakovlev D. L.¹

¹Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

²Faculty of Radiophysics and Computer Technologies of the Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the theoretical principles and the practical implementation of a machine vision system based on a digital stereo camera for remote measurement of spatial coordinates and object sizes without the need for reference objects in the field of view. A system calibration methodology and measurement accuracy data are provided.

Keywords: machine vision, stereo imaging, disparity, digital photography, correlation processing.

Адрес для переписки: Калинов В. С., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: v.kalinov@ifanbel.bas-net.by

Задачи измерения расстояний до объектов на местности и определения размеров этих объектов в архитектуре и строительстве, геодезии и картографии, метрологии, криминалистке и других областях деятельности традиционно решались с помощью устройств типа линеек и рулеток, что создавало известные сложности при работе с габаритными и труднодоступными объектами.

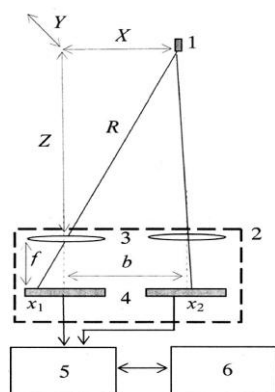
Такие современные измерительные средства, как лазерные дальномеры или лидары, позволяют определить расстояние до удаленных предметов, но для получения линейных размеров этих предметов приходится прибегать к сложным техникам измерения, например, триангуляции, при этом в случае возникновения необходимости уточнения измерений или определения дополнительных размеров нужен повторный выезд на место, что не всегда удобно, а в случае, например, осмотра места происшествия – и не всегда возможно.

При необходимости получения большого массива измерительной информации с возможностью фиксации подробностей (даже не представляющих интерес на текущий момент) часто используют фотограмметрию, что требует проведения трудоемкой обработки нескольких фотографий анализируемого трехмерного объекта, полученных с разных ракурсов съемки.

В настоящем сообщении мы предлагаем измерительный прибор на основе цифровой стереофотокамеры, позволяющий дистанционно определять размеры объектов и расстояния до них без применения эталонных мерных объектов в поле зрения по сохраненной стереофотографии. Принципиальная схема разработанной системы [1] представлена на рисунке 1.

Два объектива 3 (рисунок 1) с фокусными расстояниями f проецируют изображение измеряемого объекта 1 на плоскости фотоприемных матриц 4. Оптические оси объективов параллельны и

пересекают соответствующие фотоприемные матрицы 4 в их центрах под углом 90° . Эпиполярные линии на плоскостях матриц 4 параллельны строкам пикселей этих матриц, стереоизображения ректифицированы. Прямоугольная система координат XYZ связана с передней фокальной плоскостью объективов 3, системы x_1y_1 и x_2y_2 – с плоскостями фотоприемных матриц. Поскольку оптические оси объективов разнесены по горизонтали на некоторое расстояние b , координаты x_1 и x_2 изображения объекта 1 не совпадают.



1 – измеряемый объект, 2 – стереокамера, 3 – объективы, 4 – фотоприемные матрицы, 5 – контроллер, 6 – персональный компьютер. X, Y и Z – пространственные координаты, x_1 и x_2 – координаты изображения на матрицах, b – расстояние между оптическими осями, a – фокусное расстояние

Рисунок 1 – Схема стереодальномера

Величина диспаратности $\Delta x = x_2 - x_1$ позволяет вычислить пространственные координаты X, Y и Z выбранной точки объекта по формулам

$$Z = \frac{f \cdot b}{\omega \cdot \Delta x}, \quad X = \frac{x \cdot \omega}{f} \cdot Z, \quad Y = \frac{y \cdot \omega}{f} \cdot Z, \quad (1)$$

где ω – размер пикселя. Расстояние L между любыми выбранными точками A и B после определения их пространственных координат X_A, Y_A, Z_A, X_B, Y_B и Z_B определяется из выражения

$$L = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (2)$$

Таким образом можно определить размеры объектов и расстояния до них, располагая стереоснимком, полученным дальномером с известными параметрами b, f и ω .

Стереоснимок с камеры передается на персональный компьютер, который производит автоматическое обнаружение величины диспаратности для выбранной оператором точки сцены с последующим переводом 2-мерных координат в 3-мерные по формулам (1) с применением оригинальных механизмов коррекции, при этом оперативная полевая цифровая стереосъемка с последующей обработкой полученных изображений в стационарных условиях позволяют рационально использовать рабочее время и дают возможность уточнять необходимые подробности в последующем, когда проведение измерений непосредственно на месте происшествия

уже недоступно. Точное определение расстояний и размерных характеристик объектов возможно только при наличии явно различимых существенных цветовых и/или яркостных контрастов необходимой площади в условиях достаточной освещенности, отсутствия неблагоприятных атмосферных явлений и оптически искажающих сред.

Определение величины диспаратности сводится к вычислению значения двухмерной нормированной корреляционной функции между областью изображения вблизи выбранной для анализа точки на одном из полукадров стереоснимка и соответствующей областью на втором полукадре в соответствии с выражением

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{x,y} (I_1(x,y) - I'_1)(I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) - I'_2)}{\sqrt{\sum_{x,y} (I_1(x,y) - I'_1)^2 \sum_{x,y} (I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) - I'_2)^2}},$$

$$I'_n = \frac{\sum_{x,y} I_n(x,y)}{x_{max} y_{max}},$$

где I_1 и I_2 – сигналы окон сканирования полукадров стереоснимка; x_{max} и y_{max} – размер сканирующего окна по горизонтали и вертикали соответственно; Δx и Δy – горизонтальная и вертикальная диспаратность соответственно; I'_1 и I'_2 – средние значения сигнала в первом и втором окне сканирования соответственно; $n = 1$.

По положению экстремума корреляционной функции $R(\Delta x, \Delta y)$ определяется сдвиг между изображениями для i -го измеряемого объекта $\Delta x_i = x_2 - x_1$. Производимая нормировка по величине среднего значения сигнала позволяет достигнуть максимального значения корреляционной функции, и при полном совпадении изображений она будет равна единице.

Точность измерения дальномера достигается применением качественных матриц на 12 М пикселей и объективов с соответствующим оптическим разрешением. Объективы стереокамеры съюстированы на бесконечность, их оптические оси выставлены параллельно. На этапе юстировки скомпенсированы ошибки, возникающие вследствие неидеальности характеристик оптических систем. Окончательная калибровка системы производится на объектах с известными размерами. Внешний вид стереокамеры представлен на рисунке 2.

Работа с объектами, находящимися в ближнем поле зрения, возможна в пределах глубины резко изображаемого пространства, определяемого конструктивными особенностями объективов. Так, для примененных при построении стереокамеры объективов с фокусным расстоянием 8 мм и горизонтальным углом зрения $43,6^\circ$ диапазон измерения расстояний снизу ограничен величиной $\sim 1,7$ м, при этом максимальная дальность ограничена разрешаемым стереосдвигом и при приемлемой точности составляет 50 м. Абсолютная погрешность измерения на расстоянии до 30 м не превышает 0,01S, на расстоянии 30...50 м – 0,03S, где S – расстояние в метрах между точкой съемки и наиболее удаленной ситуационной точкой. Применение субпиксельной коррекции позволяет повысить разрешение до 1/8 пикселя.



Рисунок 2 – Внешний вид стереокамеры

Анализ выражения (1) показывает, что при фиксированном ω одна и та же диспарантность

может быть достигнута при $b \cdot f = const$. Выбор этих параметров целиком определяется конкретными задачами измерения.

Литература

1. Патент РБ № 13744. Дальномер на цифровой стереофотокамере / В. С. Калинов, В. Л. Козлов, Д. Л. Яковлев; заявитель и патентообладатель [указать при наличии]. – № 20231111; опубл. 07.05.2025. – 5 с.

УДК 004.774

АТАКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QR-КОДОВ

Ковынев Н. В.

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются распространенные атаки при помощи qr-кодов, а также некоторые способы противодействия данным атакам.

Ключевые слова: qr-код, фишинг, qr-фишинг, квишинг.

QR-CODE ATTACKS

Kovynyov N. V.

Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russia

Abstract. This article applies mass measures using QR codes, as well as some methods to counter these attacks.

Keywords: QR code, fishing, QR-fishing, quishing.

Адрес для переписки: Ковынев Н. В., МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: nvkovynyov@bmsu.ru

Активное развитие информационных технологий, их внедрение в повседневную жизнь общества, позволяют злоумышленникам находить новые способы по обману граждан, используя различные уязвимости современных технологий. Высокий уровень популярности мобильных технологий позволяет реализовывать фишинговые атаки на новых направлениях. Одни из самых распространенных способов реализации фишинга – это поддельные ссылки на вредоносные сайты, поддельные электронные письма, ссылки, которые очень похожи на адреса популярных сайтов (магазины, информационные ресурсы, какие-либо площадки, торговые площадки).

С внедрением qr-кодов во многие отрасли современной жизни такие как: банковская, маркетинговая, логистическая, государственная, образовательная и другие, у злоумышленников появились новые возможности для обмана граждан. Атаки с использованием qr-кодов только набирают популярность, но уже имеют ряд неоспоримых преимуществ: легкая генерация и связывание с поддельным сайтом; широкая область применения qr-кодов; отсутствие каких-либо визуальных признаков, гарантирующих подлинность или наоборот; невозможность проверки информации, которую содержит qr-код, без сканирования; широкое распространение различных считывателей qr-кодов. Помимо этого, высокое распространение для таких атак играет огромное количество мобильных телефонов, потому что большинство настольных операционных систем компьютеров имеет защиту от фишинга, телефоны же гораздо более уязвимы к таким атакам.

Использование qr-кодов для фишинговых атак получило название «квишинг». Данный термин определяют следующим: квишинг или qr-фишинг –

угроза информационной безопасности, при реализации которой злоумышленник использует qr-код, чтобы перенаправить жертву на вредоносный сайт, загрузки вредоносного контента, кражи персональных данных или несанкционированных финансовых операций. При получении нужных данных или если жертва переходит на нужный интернет-ресурс, злоумышленник при помощи различных способов психологического воздействия или методов социальной инженерии может получить персональные данные жертвы, конфиденциальную информацию, доступ к финансовым ресурсам жертвы.

Одними из распространенных способов использования qr-кодов являются: создание qr-кодов, содержащих ссылки на поддельные сайты; подмена физических или цифровых кодов крупных компаний, которые расположены в доверенных местах; маскирование под рекламные компании различных брендов; маскирование под официальные способы оплаты или просмотра различных товаров и услуг.

Использование qr-фишинга позволяет злоумышленнику обходить традиционные способы борьбы с фишингом. Данное преимущество достигается из-за того, что системы обнаружения вторжений, системы обнаружения вредоносного программного обеспечения и различные почтовые фильтры способны блокировать подозрительные сообщения только при наличии ссылок или каких-либо вложений. Данный способ фишинга же позволяет злоумышленнику встраивать поддельный qr-код в письма в виде изображений, добавить его в документы с безопасным расширением, интегрировать в различные файлы рассылки компаний, разослать через социальные сети, распространить через какие-либо печатные материалы рекламного или научно-популярного формата. Описанные способы

позволяют вредоносному письму избежать попадания в раздел «спам», в результате чего, пользователь остается один на один в борьбе со злоумышленником. Если жертва сканирует вредоносный qr-код со своего личного телефона, то она перенаправляется на вредоносный сайт, где могут быть предложены различные формы взаимодействия: ввод личной информации (персональные данные, финансовые реквизиты). В данном случае сайт может запросить: имя пользователя; адреса электронной почты; номер мобильного телефона, для высылки кода подтверждения; дату рождения или же какие-либо данные учетной записи; данные банковских карт для проведения тех или иных операций.

Для уменьшения вероятности реализации угрозы необходимо использовать технические способы противодействия. Одним из таковых способов является использование приложений (Kaspersky QR Scanner; Norton Snao QR Code Reader; Dr. Web Security Space) с функцией предварительного анализа содержимого qr-кода перед открытием ссылки в нем. Также не стоит забывать про организационные меры и работу с персоналом: проведение регулярного обучения и повышения квалификации персонала в данном вопросе; разработка и внедрение политики взаимодействия и использования qr-кодов внутри организации и при контактах с партнерами; регулярные проверки выполнения должностных инструкций и знаний у работников. Также стоит отметить проработку мер по установлению стандартов при использовании qr-кодов в коммерческих и государственных сервисах, усиление ответственности при использовании qr-кодов в мошеннических или незаконных целях.

Одной из главных задач является – безопасное взаимодействие с qr-кодами: проверка url адреса после сканирования qr-кода, чтобы убедиться, что это предполагаемый сайт, и он выглядит подлинным; соблюдение осторожности при вводе личной, финансовой информации, данных учетных записей, при входе на интернет-ресурсы доступ к которым осуществляется при помощи qr-кодов; внимательно смотреть на средства платежа с использованием qr-кодов для доступа на сайт оплаты, если данный сайт вызывает сомнения, то лучше собственноручно ввести самому сайт в браузере для завершения транзакции; проявление внимания и осторожности при работе со

срочными запросами, особенно если они сопровождаются различными угрозами; крайне нежелательно загружать приложения на свои смартфоны через qr-коды, лучше найти его и загрузить через официальный магазин приложений на смартфоне.

В заключении стоит отметить: если вы считаете, что сообщение выглядит законным, то можно проверить подлинность отправителя при помощи номера телефона или сайта, подлинность которого подтверждена для проверки информации; законные компании всегда высылают инструкции для взаимодействия с их сервисами, также они не высылают qr-коды для подтверждения учетных записей, точно также sms сообщения с неизвестных номеров или непонятных источников могут содержать поддельные qr-коды, поэтому если нет уверенности в подлинности qr-кода, лучше его не сканировать; стоит внимательно изучать адреса, с которых приходит электронная почта; не стоит забывать про регулярное обновление программного обеспечения вашего устройства, использование надежных паролей и многофакторной аутентификации в ваших учетных записях; обязательно подтверждение url сайта, связанного с qr-кодом; стараться не пересылать личную информацию, не совершать платежи или загрузку приложений при помощи qr-кода, если не уверены в его подлинности, так как данный способ поможет злоумышленникам получить доступ к конфиденциальной информации или к вашим финансовым активам.

Литература

1. Копнин, А. А. QR-фишинг: современные угрозы в эпоху цифровизации / А. А. Копнин // *ВИ-технологии и корпоративные информационные системы в оптимизации бизнес-процессов цифровой экономики: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. / Урал. гос. экон. ун-т. – Екатеринбург: УрГЭУ, 2025. – С. 18–21.*
2. Кибербезопасность. Quishing – отличие от smishing и vishing / А. В. Аменицкий [и др.] // *Наука, общество, технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. – Пенза: Наука и просвещение, 2024. – С. 181–192.*
3. Кадыров, Р. Р. Защита личных данных при использовании QR-кодов / Р. Р. Кадыров // *Инициативы молодых – науке и производству: сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. – С. 406–409.*

УДК 615.47

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ В МЕДИЦИНСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кудина А. В.¹, Франко Е. П.¹, Габец В. Л.², Ахмед Сохайб¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматривается применение датчиков в медицинских диагностических системах, что становится ключевым аспектом современного здравоохранения. В условиях быстрого развития технологий, использование различных типов датчиков значительно улучшает процесс диагностики и

мониторинга состояния пациентов. Работа подчеркивает важность дальнейших исследований в этой сфере и перспективы развития новых технологий для повышения эффективности медицинской диагностики.

Ключевые слова: датчики, системы диагностики.

APPLICATION OF SENSORS IN MEDICAL DIAGNOSTIC SYSTEMS

Kudina A. V.¹, Franco E. P.¹, Gabets V. L.², Ahmed Sohaib¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. This work discusses the use of sensors in medical diagnostic systems, which is becoming a key aspect of modern healthcare. In the context of rapid technological development, the use of various types of sensors significantly improves the process of diagnostics and monitoring of patients. This work highlights the importance of further research in this area and the prospects for the development of new technologies to improve the efficiency of medical diagnostics.

Keywords: sensors, diagnostic systems.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. П. Бровки 6, г.Минск, 22013, Республика Беларусь

e-mail: a.kudina@bsuir.by

Все устройства для сбора медицинской информации делятся на две категории: электроды и датчики. Электроды предназначены для регистрации электрических сигналов, которые присутствуют в организме, в то время как датчики представляют собой устройства, которые с помощью своего чувствительного элемента реагируют на измеряемую величину и преобразуют это воздействие в форму, удобную для дальнейшей обработки.

С появлением и развитием технологий Интернет вещей (IoT) и носимых устройств, роль датчиков в медицине становится все более ощутимой. Они обеспечивают оперативный сбор данных, что критически важно для ранней диагностики и профилактики заболеваний.

Датчики могут быть классифицированы по типу измеряемого параметра: температурные, биохимические, электрофизиологические и т. д., и по способу установки: инвазивные и неинвазивные. Например, терморегуляционные датчики используются для контроля температуры тела, в то время как глюкометры с инкапсулированными датчиками позволяют пациентам отслеживать уровень сахара в крови в режиме реального времени. Инвазивные технологии, такие как датчики давления, широко применяются в кардиологии для мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы.

Ключевые направления применения датчиков в медицинской области: биосенсоры, датчики сердечного ритма, датчики температуры, датчики кислорода в крови, датчики движения и физической активности, имплантируемые датчики, устройства для мониторинга состояния беременных, умные медицинские системы.

Биосенсоры используются для определения определенных биомаркеров в образцах биологических жидкостей (кровь, слюна, моча). Биосенсоры могут использоваться для раннего выявления болезней, таких как диабет (глюкозные сенсоры), онкологические заболевания (определение опухолевых маркеров) и инфекционные болезни (определение антител к патогенам). В области фармацевтики биосенсоры используются для тестирования новых

лекарственных средств и диагностики их действия на клеточном уровне. Также биосенсоры играют ключевую роль в разработке индивидуализированных подходов к лечению, позволяя докторам адаптировать терапию в зависимости от конкретного биохимического профиля пациента.

Датчики сердечного ритма широко используются в кардиологии. Они могут контролировать сердечный ритм в реальном времени, что позволяет выявлять аритмии и другие сердечно-сосудистые заболевания. Датчики сердечного ритма измеряют частоту сердечных сокращений (ЧСС) и могут использоваться в различных системах, таких как электрокардиографы, нагрудные и наручные системы мониторинга.

Электрокардиографы (ЭКГ) используются для регистрации электрической активности сердца. Позволяют диагностировать аритмии, ишемическую болезнь и другие сердечные расстройства. Нагрудные и наручные мониторинги: Различные устройства, включая умные часы, которые отслеживают ЧСС в режиме реального времени.

Датчики кислорода в крови, также известные как пульсоксиметры, представляют собой медицинские устройства, которые измеряют уровень кислорода в крови пациента. Они играют важную роль в оценке состояния дыхательной системы и общего здоровья пациента. Датчики кислорода в крови работают на основе оптического метода, который включает использование светодиодов и фотодетекторов. Приборы излучают две длины волн света (обычно красный и инфракрасный) через кожу, чаще всего на пальце, ухе или лодыжке. Кровь, насыщенная кислородом, поглощает свет по-разному по сравнению с ненасыщенной. Анализируя изменение поглощения света, устройство рассчитывает процентное содержание оксигемоглобина в крови и отображает его в виде насыщенности кислородом.

Пульсоксиметры широко используются в больницах для мониторинга состояния пациентов, особенно тех, кто перенес операции, страдает от заболеваний дыхательных путей или находится в критическом состоянии. Они также

используются для раннего выявления гипоксии (недостатка кислорода в организме), что позволяет медицинским работникам быстро реагировать на ухудшение состояния пациента. В последние годы пульсоксиметры стали популярны среди спортсменов для отслеживания уровня кислорода в крови во время тренировок на высоте или при интенсивных физических нагрузках.

Датчики движения и физической активности, такие как фитнес-трекеры, могут использоваться для мониторинга уровня активности пациентов, что помогает в реабилитации и профилактике заболеваний, связанных с малоподвижным образом жизни.

Контроль температуры тела является важным аспектом диагностического процесса. Инфракрасные термометры и термодатчики могут использоваться для быстрого и безопасного измерения температуры, что особенно актуально в процессе выявления инфекционных заболеваний.

Современные технологии позволяют разрабатывать миниатюрные имплантируемые устройства, которые могут контролировать различные параметры (например, давление, уровень глюкозы) в течение длительного времени без необходимости постоянного вмешательства.

Имплантируемые датчики работают на основе различных технологий, включая оптику, электромагнитные поля, химические реакции и механические измерения. Они могут отслеживать такие параметры, как: температура тела, давление крови, уровень глюкозы, уровень кислорода в крови, движение и активность сердца.

Имплантируемые датчики позволяют проводить постоянный мониторинг состояния пациента, что особенно важно для хронических заболеваний. Эти устройства могут выявлять проблемы на ранней стадии, что способствует более эффективному лечению. Данные, собираемые датчиками, могут быть переданы врачу в режиме реального времени, что позволяет принимать более обоснованные ре-

шения. Однако установка датчиков требует хирургического вмешательства, что связано с определенными рисками. Как и при любой хирургической процедуре, существует вероятность инфицирования. Материалы, из которых сделаны датчики, должны быть безопасны для организма и не вызывать аллергических реакций.

Стремительное развитие Интернета вещей (IoT) и телемедицины позволяет интегрировать датчики в умные медицинские системы, которые дают возможность дистанционного мониторинга состояния пациентов и обмена данными между врачами и специалистами.

Несмотря на значительные преимущества, внедрение датчиков в медицинские диагностические системы сталкивается с определенными трудностями: проблемы с точностью и надежностью данных, получаемых от датчиков, защита конфиденциальности и безопасность данных пациента, необходимость стандартизации и сертификации медицинских устройств.

Будущее применения датчиков в медицинских системах выглядит многообещающе. С ростом интереса к персонализированной медицине и развитием технологий машинного обучения, мы можем ожидать, что датчики станут неотъемлемой частью диагностических процессов. Их способность обрабатывать большие объемы данных в реальном времени откроет новые возможности в области ранней диагностики и профилактики заболеваний.

Литература

1. Баника, Ф. Г. Химические и биологические сенсоры: основы и применения / Ф. Г. Баника. – М.: Техносфера, 2014. – 871 с.
2. Шурыгин, И. А. Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия / И. А. Шурыгин. – СПб.: Невский Диалект; М.: БИНОМ, 2000. – 301 с.
3. Медицинская электронная аппаратура для здравоохранения / под ред. Р. И. Утямышева; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. – 352 с.

УДК 621.3.049.75

АВТОМАТИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В САМ350

Кузнецова Д. И.^{1,2}, Симанкова А. В.¹, Щербакова Е. Н.²

¹ООО «МИРПРОИЗ»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается процесс автоматизации создания монтажных панелей печатных плат с использованием программного обеспечения САМ350. Описаны методы оптимизации раскладки и объединения нескольких плат в одну панель, что позволяет повысить эффективность производства и снизить затраты времени. Представлены оригинальные алгоритмы и подходы к автоматической расстановке перемычек и технических ограничений, обеспечивающие надежность конструкции и удобство последующего монтажа. Полученные результаты демонстрируют значительное сокращение времени подготовки производства и снижение количества ошибок.

Ключевые слова: печатная плата, панель, реперные знаки, перемычки.

AUTOMATION OF PCB PANEL CREATION IN CAM350

Kuznetsova D.I.^{1,2}, Simankova A.V.¹, Shcherbakova E.N.²

¹LLC "MIRPROIZ"

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. This work explores the automation of PCB panel creation using CAM350 software. Methods for optimizing layout and combining multiple boards into a single panel are described, improving production efficiency and reducing time costs. Original algorithms and approaches for automatic placement of jumpers and technical constraints are presented, ensuring structural reliability and ease of assembly. The results demonstrate significant reduction in production preparation time and a decrease in error rates.

Keywords: PCB, panel, fiducial marks, jumpers.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Печатные платы служат ключевым элементом радиоэлектронных устройств, обеспечивая как механическое крепление, так и электрическое соединение компонентов в соответствии с проектной схемой.

Панель из печатных плат позволяет одновременно обрабатывать несколько плат, что ускоряет производство и снижает себестоимость. Это обеспечивает удобство и точность автоматического монтажа компонентов, упрощает контроль качества и выявление брака до разделения плат. Также панели удобны для транспортировки и хранения, минимизируя риск повреждений.

Для того, чтобы создать панель печатных плат в программе CAM350, первоначально необходимо загрузить Gerber-файлы в программу и распаковать их, пример вида печатной платы приведен на рисунке 1.

После того, как были выгружены Gerber-файлы, мы определяем тип каждого слоя. Это значит, что в программу все слои печатной платы выгружаются под одним и тем же именем – Grafic.

Задача оператора – обозначить точно каждый слой печатной платы, чтобы в дальнейшем понимать, с какими слоями будет осуществляться работа. Далее необходимо проверить слои маски на сторонах Top и Bottom.

Защитная маска печатной платы – это слой специального материала, который наносится на поверхность для предотвращения коррозии, коротких замыканий и повреждений медных дорожек, а также для обеспечения изоляции между проводниками.

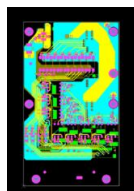


Рисунок 1 – Вид печатной платы в программе CAM350

Суть проверки заключается в том, что необходимо убедиться в отсутствии слипшихся вскрытий из-под маски. Минимальное расстояние между площадками должно составлять 0,1 мм, оно нужно для образования так называемого «мачочного мостика».

После завершения проверки вскрытия из-под маски необходимо разместить реперные знаки на сторонах Top и Bottom. На слоях Soldermask Top и Soldermask Bottom, соответствующих слоям вскрытия маски, следует добавить круги диаметром 2 мм. На слоях Top и Bottom поверх этих кругов необходимо нанести круги диаметром 1 мм.

Реперные знаки на печатной плате используются для точного позиционирования и ориентации платы в процессе производства и монтажа компонентов. Обычно их размещают в трех углах платы, при этом два знака располагаются максимально удаленно друг от друга. Это обеспечивает корректное распознавание платы автоматическими системами и правильное размещение элементов.

После окончания проверки вскрытия из-под маски и расстановки реперных знаков, начинается разработка панели печатных плат. На данном этапе очень важно смоделировать такую заготовку, которая не деформируется при автоматическом монтаже, также которая не будет слишком «хлипкой». Поэтому для того, чтобы укрепить заготовку для начала необходимо определить какой тип разделения печатных плат будет использоваться.

Самые распространенные способы разделения печатных плат: разделение с помощью фрезы и скрайбирование.

Фрезеровка печатных плат представляет собой процесс механической обработки, при котором с помощью специальных фрез удаляется лишний слой материала вокруг дорожек и контактных площадок для создания изолированных электрических цепей.

Скрайбирование – это подрезка материала на плате в виде буквы V, которая облегчает последующее разделение платы на отдельные части. Скрайбирование используется только для прямоугольных плат, толщиной больше 1,5 мм. В данном случае применялся метод разделения печатных плат с помощью фрезеровки. Для реализации данного способа в программе необходимо создать контур фрезы с стандартной шириной 2 мм. Иными словами, необходимо выполнить прорисовку фрезеровочного контура по периметру печатной платы.

После того как был выбран способ разделения – фреза, нужно расставить перемины, с помощью них печатные платы будут скреплены между собой

и технологическим полем. Перемычки на заготовке печатной платы нужны для удержания отдельных частей платы вместе до окончательного разделения, обеспечивая целостность и удобство обработки.

Заключительным этапом данного процесса является разработка заготовки. Рекомендуемые размеры заготовки – от 100×100 мм до 200×200 мм, однако конкретные параметры зависят от типа и конструкции печатных плат.

В рассматриваемом случае размер печатной платы составляет 68×118 мм, поэтому оптимальным был выбран размер итоговой панели 152×132 мм.

Далее необходимо вновь разместить реперные знаки, но уже на технологическом поле заготовки: по три реперных знака в двух противоположных углах с шагом 10 мм. По завершении всех операций формируется заготовка, пример вида которой представлен на рисунке 2.

Представленный в данной работе алгоритм и подходы к созданию панелей печатных плат,

обеспечивают надежность конструкции и удобство последующего монтажа.

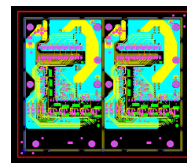


Рисунок 2 – Вид заготовки печатных плат в программе CAM350

Данная работа выполнена благодаря информации, предоставленной ООО «МИРПРОИЗ», а именно отделом подготовки производства печатных плат и трафаретов.

Литература

1. Аминджанов, Т.А. Азбука радиоэлектроники и секретов стабильного высокого качества / Т. А. Аминджанов, А. А. Марков, Я. Н. Rogozovets. – Санкт-Петербург: Академия безопасности StarLine, 2024. – 288 с.

УДК 629.7.025.4:004.932.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОРАЗВЯЗКИ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Ломако А. А., Ивуть П. В., Домарацкий А. В.

НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ», Минск, Беларусь

Аннотация. Разработан метод оценки эффективности виброразвязок для целевой аппаратуры беспилотных летательных аппаратов на основе анализа видеопотока алгоритмами компьютерного зрения (Ши-Томаши и Лукаса-Канаде). Сравниваются виброизоляторы, работающие на сжатие (с силиконовыми демпферами) и на растяжение (с лепестковыми демпферами). Установлено, что конструкции на растяжение до 20 % эффективнее подавляют вибрации в исследуемом частотном диапазоне и менее критичны к точному подбору параметров под массу аппаратуры.

Ключевые слова: БЛА, демпферы, оптический поток, детекторы точек, быстрое преобразование Фурье.

EVALUATING UAV PAYLOAD VIBRATION ISOLATION EFFECTIVENESS USING COMPUTER VISION

Lamaka A. A., Ivuts P. V., Damaratski A. V.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. A method for evaluating the effectiveness of vibration isolation systems for unmanned aerial vehicle (UAV) payload equipment has been developed, based on the analysis of video stream data using computer vision algorithms (Shi-Tomasi and Lucas-Kanade). Vibration isolators working on compression (with silicone dampers) and on tension (with petal-type dampers) are compared. It was found that tension-based structures suppress vibrations in the studied frequency range up to 20% more effectively and are less critical to the precise selection of parameters based on the payload mass.

Keywords: UAV, dampers, optical flow, feature point detectors, Fast Fourier Transform.

Адрес для переписки: Ломако А. А., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: alekseylomako@gmail.com

Введение. В настоящее время во многих направлениях науки в качестве платформ для целевой аппаратуры, регистрирующей информацию, используются беспилотные летательные аппараты (БЛА). Для компенсации ветровых помех и наклона БЛА в процессе измерений, как правило, используются гиростабилизаторы, непосредственно на которые крепится съемочная аппаратура. С целью уменьшить влияние колебаний, обусловленных работой мультироторных БЛА, в месте крепления гиростабилизатора к корпусу летательного аппарата

в качестве промежуточного звена устанавливаются специализированные вибродемпферы, которые в совокупности с механизмами крепления называются виброразвязкой. Для разрабатываемой в настоящее время гиперспектральной автоматизированной летной системы на текущем этапе важно выбрать наиболее эффективную схему виброразвязки. В данном исследовании ставилась цель оценить эффективность различных видов конструкций виброразвязки с использованием методов компьютерного зрения. Входными для таких методов являлись

данные видеоряда, полученные в процессе натурных испытаний с использованием разработанного ранее беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования [1].

Конфигурации виброразвязок. В качестве виброразвязок использовались конструкции различного вида. Основы конструкций печатались на FDM 3D-принтере.

Для оценки вибронгрузки без компенсации вибраций использовался подвес с жестким креплением целевой аппаратуры к корпусу БЛА (рисунок 1, а). Данные, полученные в этом случае, принимались за основу для сравнения эффективности работы различных конфигураций стабилизаторов. Такие конфигурации можно разделить на 2 типа: работающие «на сжатие» и работающие «на растяжение».

В конструкции, работающей за счет использования физических принципов противодействия сжатию (рисунок 1, б), для компенсации вибраций использовались силиконовые демпферы, размер и жесткость которых выбирались эмпирически из доступных покупных изделий. В конструкции, работающей на основе использования принципов противодействия растяжению (рисунок 1, в), для компенсации вибраций были разработаны специализированные лепестковые демпферы, для изготовления которых применялась филаментная 3D-печать. В работе исследовались 2 варианта лепестковых демпферов: в одном из них на каждом из четырех демпферов имелось по 4 гибких грани (лепестка), на втором – по 3 лепестка (вариант с уменьшенной жесткостью). Экспериментальная оценка эффективности в данном случае потребовалась вследствие высокой сложности моделирования работы такого рода демпферов.

Методика обработки данных видеоряда для оценки динамики угловых колебаний БЛА. В алгоритме обработки данных видеопотока имеется несколько взаимосвязанных этапов. Исходное видео (1080 p, 30 fps) обрабатывается с использованием алгоритма оптического потока Лукаса-Канаде [2], что позволяет отслеживать перемещение характерных точек между последовательными кадрами. Для поиска этих точек (в количестве 300 единиц для каждого кадра с фильтрацией выбросов методом RANSAC [3]) применялся детектор ключевых точек Ши-Томаша [4].

На основе полученных смещений точек вычисляется аффинное преобразование между кадрами, из которого извлекаются три ключевых параметра: линейные смещения по осям X и Y (соответствующие крену и тангажу) и угол поворота (рыскание). Перевод пиксельных смещений в угловые величины выполняется с учетом высоты полета и пространственного разрешения камеры. Далее для заданного временного диапазона на основе быстрого преобразования Фурье в применении к угловым зависимостям определяются амплитудный спектр и спектр мощности

колебаний углов Крылова. Проводилось сопоставление полученных характеристик для различных типов подвесов с оценкой снижения энергии в частотном диапазоне от 0 до 12 Гц.

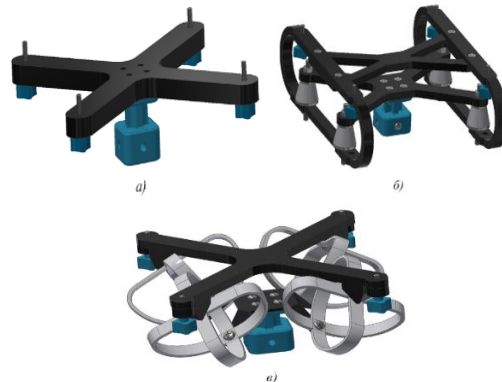


Рисунок 1 – Конструкции жесткого крепления аппаратуры (а) и типов виброразвязки: с силиконовыми демпферами (б) и лепестковая (в)

Заключение. В результате экспериментов было выявлено, что конструкции, работающие «на растяжение», в среднем до 20 % эффективнее снижают мощность вибраций в проанализированном диапазоне частот по сравнению с конструкцией, работающей «на сжатие». Кроме того, важно отметить, что для качественной работы демпферов, работающих по амортизирующему принципу, необходим точный подбор параметров гасителей вибраций в зависимости от массы целевой аппаратуры. С другой стороны, работающие «на растяжение» конструкции менее требовательны к этому параметру, что подтверждается малой степенью различий при экспериментальном сравнении эффективности трех- и четырехлепестковых гасителей в данной работе.

Благодарности. Работа проводится в рамках выполнения отдельного проекта Министерства Образования РБ «Исследование и разработка методов интеллектуального анализа данных, регистрируемых с использованием гиперспектральной автоматизированной летной системы».

Литература

1. Photospectral Data Obtaining with the Un-manned Aerial Spectrometry Vehicle / A. A. Lamaka, A. V. Gutarau, N. G. Shcherbakou, P. V. Ivuts // *Devices and Methods of Measurements*. – 2023. – № 1. – P. 7–17.
2. Lucas, B. D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision / B. D. Lucas, T. Kanade // *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. – 1981. – Vol. 2. – P. 674–679.
3. Fischler, M. A. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / M. A. Fischler, R. C. Bolles // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24, № 6. – P. 381–395.
4. Shi, J. Good features to track / J. Shi, C. Tomasi // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 1994. – P. 593–600.

УДК 539.2

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ ТИТАНА

Маркевич М. И.¹, Щербакова Е. Н.²

¹Физико-технический институт НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены методы получения пленок силицидов тугоплавких металлов для изделий микроэлектроники. Акцент делается на формирование силицидов титана методом быстрой термической обработки (БТО). Рассматриваются факторы, ускоряющие протекание реакций формирования силицидов.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, силициды титана, микроэлектроника.

METHODS FOR OBTAINING TITANIUM SILICIDE FILMS

Markevich M. I.¹, Shcherbakova E. N.²

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

²Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus

Abstract. Methods for obtaining films of silicides of refractory metals for microelectronics products are presented. The emphasis is on the formation of titanium silicides by rapid thermal annealing (RTA). The factors accelerating the reactions of formation of silicides are considered.

Keywords: rapid thermal annealing, titanium silicides, microelectronics.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: scherbakova@bntu.by

Разработка прогрессивных методов синтеза функциональных материалов с заданными свойствами представляет собой одно из приоритетных направлений в микроэлектронике. Значительный практический интерес в этой области вызывают силициды титана, которые находят разнообразное применение в технологии производства полупроводниковых интегральных схем.

Ключевой задачей при синтезе соединений в твердой фазе является управление их реакционной способностью, на которую влияет комплекс факторов: температурный режим, состав газовой среды, механические напряжения, кристаллическая структура исходных веществ и концентрация дефектов в них. Обеспечение однородных условий по всему объему образца является критически важным для создания воспроизводимого технологического процесса формирования силицидов титана. Важным технологическим преимуществом силицидов титана является множественность методов их получения. В таблице 1 представлен обзор основных способов формирования силицидов металлов.

Среди перечисленных методов БТО с использованием различных источников энергии является наиболее распространенным для синтеза силицидов тугоплавких металлов.

К достоинствам БТО относятся высокая производительность, технологичность и воспроизводимость. Кратковременность процесса минимизирует нежелательное воздействие окружающей среды на формирующиеся силициды и снижает термическую нагрузку на ранее сформированные элементы интегральных схем [1].

Экспериментальные данные подтверждают ускорение кинетики синтеза силицидов титана при использовании БТО с такими источниками энергии, как вольфрамовые лампы [10], графитовые нагреватели [11] и ИК-лазеры [12]. Общим для этих источников является то, что их излучательный спектр лежит в оптическом диапазоне. Времена, необходимые для формирования конечной фазы дисилицида титана в системе Ti-Si, сокращаются с 30–60 минут при стационарном отжиге до 10–140 секунд при БТО [1–4].

В научной литературе обсуждаются различные гипотезы, объясняющие ускорение реакций силицидообразования при БТО. Согласно [12], основной вклад вносит снижение влияния газовых примесей из-за малой длительности процесса.

При БТО интенсивным световым потоком энергия поглощается материалом, причем механизм ее передачи решетке определяется оптическими свойствами и морфологией поверхности [1–8]. В полупроводниках поглощение энергии – электромагнитного излучения происходит посредством возбуждения электронов, что приводит к возникновению значительных температурных градиентов и нестационарному теплопереносу. Временные и энергетические параметры фотонного воздействия таковы, что могут индуцировать эффекты, не наблюдаемые при стандартном отжиге и не описываемые в рамках классической термодинамики необратимых процессов.

Исследования [13, 14] демонстрируют, что при обработке импульсным лазерным излучением скорость роста зерен в металлических пленках может на несколько порядков превышать скорость при стационарном отжиге. Это явление связывают

сохранением в осажденных пленках высокой неравновесной концентрации вакансий (до 10^{-4}).

Для интерпретации аномально высокой скорости диффузии металлов в кремнии при БТО также предлагался механизм многократно возбужденных узлов или узлов с двумя однократно возбужденными связями, которые могут создавать каналы для ускоренного переноса вещества.

Таким образом, можно заключить, что на кинетику реакций при БТО оказывают одновременное влияние как термические, так и специфические нетермические факторы.

Таблица 1 – Методы синтеза силицидов металлов

Метод	Характеристика метода
1. Нанесение металла на кремниевую подложку с последующим синтезом силицида методами: – стационарного или быстрого термического отжига [1, 2]; – лазерного излучения [3, 4]; – ионно-лучевого перемешивания [3]	Чувствительность к чистоте границы раздела металл-кремний и высокой концентрации примесей. Возможность селективного формирования силицида на заданных участках. Наиболее распространен для силицидов Pt, Pd, Co, Ti
2. Со-испарение или со-распыление металла и кремния из раздельных мишеней [5]	Сложность точного контроля стехиометрии процесса. Низкая конформность покрытия рельефных поверхностей. Преимущественно используется в исследовательских, а не промышленных целях
3. Физическое распыление из композитных мишеней	Трудности, связанные с изготовлением высокочистых композитных мишеней; риск загрязнения примесями (C, O, Ar, Na). Низкая конформность покрытия
4. Реактивное катодное распыление металлических мишеней в атмосфере силана и аргона [6]	Отсутствует расход кремния из подложки. Технологическая сложность процесса, связанная с использованием токсичного силана
5. Осаждение металла на подложки, нагретые до температуры начала твердофазной реакции [7]	Перспективный метод, находящийся в стадии исследований; позволяет реализовать эпитаксиальный рост. Низкая совместимость со стандартными КМОП-техпроцессами
6. Ионно-стимулированный твердофазный синтез [8]	Ограниченная совместимость с КМОП-технологиями. Сложность технической реализации
7. CVD-пиролиз [9]	Высокопроизводительный промышленный метод. Обеспечивает высокую чистоту, воспроизводимость микроструктуры и превосходную конформность покрытия

Литература

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2004. – 531 с.
2. Иевлев, В. М. Формирование пленок силицидов металлов методами импульсной фотонной обработки / В. М. Иевлев, С. Б. Куцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия Материаловедение. – 1997. – Вып. 1. – С. 8–12.
3. Борисенко, В. Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве / В. Е. Борисенко. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 248 с.
4. Вейко, В. П. Лазерные технологии в микроэлектронике / В. П. Вейко, С. М. Метев. – София: Изд-во Болгарской АН, 1991. – 363 с.
5. Белевский, В. П. Интегрированные ионные процессы в тонкопленочной технологии формирования силицидов титана / В. П. Белевский, В. Г. Вербицкий // Харьковская научная ассамблея. – 2001. – С. 106–107.
6. Gupta, A. Eximer laser-induced chemical vapor deposition of titanium silicide / A. Gupta, G. A. West, K. W. Beeson // J. Appl. Phys. – 1985. – V. 58, № 9. – P. 3573–3582.
7. Influence of slight deviations from TaSi₂ stoichiometry on the high-temperature stability of tantalum silicide / silicon contacts / H. Oppolzer [et al.] // J. Vac. Sci. Tech. – 1984. – V. B2(4). – P. 630–635.
8. Selective deposition of Ti: an interface study / C. Nender [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. – 1987. – V. A5(4). – P. 1703–1707.
9. Tanielian, M. Titanium disilicide formation by sputtering of titanium on heated silicon substrate / M. Tanielian, S. Blackston // Appl. Phys. Lett. – 1984. – № 6. – P. 673–675.
10. Formation of titanium silicides by fast radiate processing / C. W. Wei [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1984. – V. 45, № 5. – P. 527–528.
11. Titanium – silicon and silicon dioxide reactions controlled by low temperature rapid thermal annealing / L.J. Brillson [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. – 1985. – A. 4, № 3. – P. 993–997.
12. Lee, H. S. Growth kinetics of Mo, W, Ti and Co silicides formed by Infrared laser heating / H. S. Lee, G. J. Wolga // J. Electrochem. Soc. – 1990. – V. 137, № 2. – P. 684–690.
13. Маркевич, М. И. Стимулированная собирательная рекристаллизация в тонких пленках ГЦК-металлов при воздействии импульсного лазерного излучения / М.И. Маркевич // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36, № 7. – С. 825–827.
14. Nanu, L. Phosphorus diffusion in silicon during rapid thermal annealing / L. Nanu, G.R. Evans // Semicond. Sci. Technol. – 1989. – V.4. – P. 711–714.

УДК 531.383

СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ В ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ ПОВОРОТОВ

Матвеев В. В., Хомяčkova А. Н., Каликанов А. В., Стрельцов Д. С.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования новых кинематических параметров, предложенных П. Циотрасом и Дж. Лонгуски в рамках теории конечного поворота. Продемонстрирована эффективность применения этих параметров для решения задач ориентации, а также предложена схема комплексирования измерений датчиков первичной информации.

Ключевые слова: параметры (w , z), стереографическая проекция, комплексирование

STEREOGRAPHIC PROJECTION IN FINITE ROTATION THEORY

Matveev V. V., Khomyachkova A. N., Kalikanov A. V., Streltsov D. S.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. The results of a study of new kinematic parameters proposed by P. Tsiotras and J. Longuski within the framework of finite rotation theory are presented. The effectiveness of applying these parameters to solving orientation problems is demonstrated.

Keywords: parameters (w, z), stereographic projection, complexation.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина 95, г. Тула 300012, Россия

e-mail: info@tsu.tula.ru

Введение. Актуальность исследования новых кинематических параметров для бесплатформенных систем ориентации обусловлена необходимостью повышения точности и надежности определения ориентации объекта в условиях сложного движения. Прогнозируемое рядом авторов прошлого столетия развитие дробно-рациональных функций комплексного переменного применительно к теории конечного поворота тела вокруг неподвижной точки [1] не было подтверждено на практике. Ориентация объекта, описанная какими-либо из кинематических параметров (углы Эйлера, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона и др.), может быть представлена посредством стереографической проекции в виде точки на комплексной плоскости w . Однако обратная процедура не позволяет восстановить полную ориентацию объекта, а определяет только положение одной из осей подвижного объекта. В работах П. Циотраса (P. Tsiotras) и Дж. Лонгуски (J. Longuski) [2, 3] решение данной проблемы достигается введением начального угла поворота z , и совокупность параметров (w, z) позволяет полностью описать ориентацию объекта.

В работе анализируются кинематические параметры (w, z) для решения задач ориентации твердого тела, а также предложен способ комплексирования датчиков первичной информации, основанный на данных параметрах.

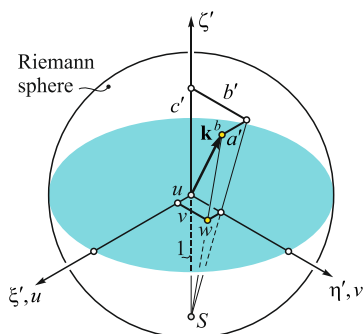


Рисунок 1 – Стереографическая проекция единичного вектора k^b связанной с телом системы координат посредством сферы Римана (Riemann sphere)

Кинематические уравнения для параметров (w, z). Параметры (w, z) представляют ориентацию тела двумя последовательными конечными поворотами, первый из которых представляет собой вращение вокруг вертикальной оси на угол z ,

при котором связанная с телом система координат занимает промежуточное положение $\xi'\eta'\zeta'$. Второй поворот описывается точкой на комплексной плоскости $w = u + jv$, представляющий собой стереографическую проекцию конца единичного вектора $k^b = (a' \ b' \ c')^T$ одной из осей связанной с телом системы координат (рисунок 1).

Кинематические уравнения для параметров (w, z) имеют вид [2, 3]

$$\begin{cases} \dot{u} = v\omega_\xi^b + uv\omega_\eta^b - \frac{1}{2}\omega_\zeta^b(1+u^2-v^2), \\ \dot{v} = -u\omega_\xi^b - uv\omega_\eta^b + \frac{1}{2}\omega_\zeta^b(1-u^2+v^2), \\ \dot{z} = \omega_\xi^b + u\omega_\eta^b + v\omega_\zeta^b, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_\xi^b, \omega_\eta^b, \omega_\zeta^b$ – проекции вектора угловой скорости тела на оси связанные с ним, z – угол первого конечного поворота; u, v – координаты точки на комплексной плоскости, определяемые стереографической проекцией одной из осей тела.

Важным преимуществом системы (1) является независимость первых двух уравнений от угла z , что позволяет интегрировать их изолированно и тем самым повысить эффективность решения задачи ориентации. Углы рыскания ψ , тангажа ϑ и крена γ определяются так:

$$\psi = \arctg \frac{(1+u^2-v^2)Sz + 2uvCz}{(1+u^2-v^2)Cz - 2uvSz'}$$

$$\vartheta = \arcsin \frac{2v}{1+u^2+v^2},$$

$$\gamma = \arctg \frac{-2u}{1-u^2-v^2}.$$

Существенно, что углы тангажа и крена определяются только параметрами u, v .

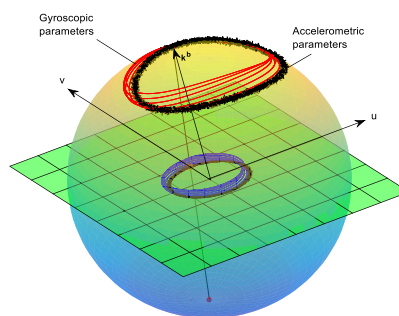


Рисунок 2 – Результаты моделирования с учетом инструментальных погрешностей датчиков первичной информации

Способ комплексирования. Для коррекции бесплатформенных систем ориентации часто применяют акселерометры – датчики кажущегося ускорения, измеряющие векторную сумму абсолютного ускорения объекта и ускорения силы тяжести. В условиях равномерного прямолинейного движения показания акселерометров $n_\xi^b, n_\eta^b, n_\zeta^b$ содержат только проекции вектора ускорения силы тяжести, что позволяет на основе их измерений сформировать координаты точки $w^a(u^a, v^a)$ на комплексной плоскости. В результате, имеет место два набора параметров на комплексной плоскости. Первый набор (u, v) формируется каналом гироскопов на основе решения кинематических уравнений (1). Так как определение параметров ориентации основано на интегрировании, то вычисление параметров (u, v) в этом случае будет сопровождаться накоплением погрешностей (рисунок 2). Поскольку определение параметров (u^a, v^a) осуществляется без процедуры интегрирования, то накопление погрешностей с течением времени отсутствует, но их значения подвержены шуму акселерометров и искажаются ускорениями объекта. Для повышения точности системы ориентации предложена схема комплексирования, изображенная на рисунке 3, в которой объединение измерений осуществляется на основе фильтра верхних частот (*high-pass filter*) и фильтра нижних частот (*low-pass filter*). Суммирование выходных сигналов фильтров позволяет сформировать комплексированные параметры ориентации (u^c, v^c) , обладающие повышенной точностью.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20077, <https://rscf.ru/project/25-29-20077/> по теме:

«Разработка алгоритмов ориентации и навигации подвижных объектов различного базирования на основе новых кинематических параметров и способов комплексирования измерительной информации». Авторы также выражают благодарность правительству Тульской области за предоставление гранта в форме субсидий (соглашение № 30-2025-000527 от 03.04.2025).

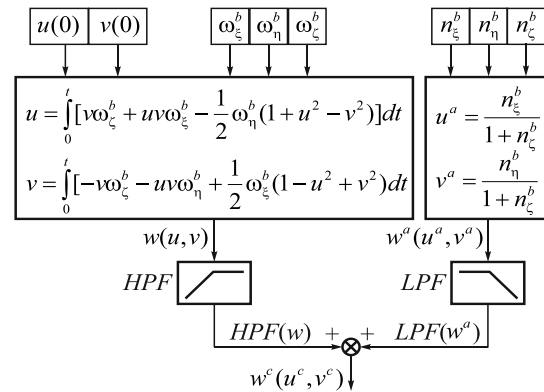


Рисунок 3 – Схема комплексирования: HPF – фильтр верхних частот (*high-pass filter*), LPF – фильтр нижних частот (*low-pass filter*)

Литература

1. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А. Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 670 с.
2. Tsiotras, P. A New Parameterization on the Attitude Kinematics / P. Tsiotras, J. M. Longuski // Journal of the Astronautical Sciences. – 1995. – Vol. 43, № 3. – P. 243–262.
3. Tsiotras, P. A novel approach to the attitude control of axisymmetric spacecraft / P. Tsiotras, M. Corless, J. M. Longuski // Automatica. – 1995. – Vol. 31, № 8. – P. 1099–1112.

УДК 534-8

СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР КАВИТАЦИИ В КОМПЛЕКТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Минчук В. С., Гаврилюк В. С., Шебеко В. П., Федоринчик М. П., Дежжунов Н. В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь

Аннотация. Создан лабораторный комплекс, обеспечивающий новые возможности экспериментального исследования акустической кавитации. Его особенностью является сочетание спектрального анализа акустического шума с пространственным картированием кавитационных полей, что позволяет переходить от локальной регистрации сигналов к трехмерному распределенному описанию процессов. Такой подход обеспечивает выявление режимов кавитации, количественную оценку ее интенсивности и изучение влияния физических параметров среды на характеристики кавитационной области. Универсальность комплекса делает его применимым как для фундаментальных исследований, так и для прикладных задач, включая испытания датчиков и кавитометров, анализ кавитационного износа и оценку эффективности ультразвуковых реакторов.

Ключевые слова: кавитация, ультразвук, кавитационный шум, измерение кавитации.

SPECTRAL-ACOUSTIC CAVITATION INDICATOR IN A LABORATORY EQUIPMENT COMPLEX

Minchuk V. S., Gavriluk V. S., Shebeko V. P., Fedorinchik M. P., Dezhkunov N. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract. A laboratory complex has been developed that provides new opportunities for experimental studies of acoustic cavitation. Its distinctive feature is the combination of spectral analysis of acoustic noise with spatial mapping of cavitation fields, which makes it possible to move from local signal registration to a three-dimensional distributed description of the processes. This approach enables the identification of cavitation regimes, quantitative assessment of their intensity, and investigation of the influence of the medium's physical parameters on the characteristics of the cavitation region. The versatility of the complex makes it applicable both for fundamental research and for applied tasks, including testing of cavitation sensors and cavitometers, analysis of cavitation erosion, and evaluation of the efficiency of ultrasonic reactors.

Keywords: cavitation, ultrasound, cavitation noise, cavitation measurement.

*Адрес для переписки: Дежкунов Н. В., ул. П. Бровки, 10, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: dnv@bsuir.by*

Акустическая кавитация представляет собой сложное нелинейное явление, сопровождающееся генерацией широкополосного акустического излучения и образованием областей интенсивных колебаний давления. Для ее исследования требуется сочетание спектральных методов анализа и пространственно разрешенных измерений, что позволяет не только фиксировать наличие кавитации, но и проводить ее количественную характеристику. С этой целью был разработан лабораторный комплекс, включающий спектрально-акустический индикатор, систему координатного позиционирования, генераторный блок, комплект пьезоэлектрических датчиков и вспомогательные модули. Общий вид установки представлен на рисунке 1. Параметры и состав комплекса могут изменяться согласно техническому заданию заказчика.

Спектрально-акустический индикатор предназначен для регистрации и анализа кавитационного шума, сопровождающего развитие кавитационных процессов. Его архитектура сочетает аналоговые каскады предварительной обработки и цифровые методы спектрального анализа. Такая комбинация позволяет не только фиксировать наличие кавитации, но и проводить ее количественную характеристику на основе параметров спектра.

Сигнал с датчика поступает на входной тракт, где осуществляется его усиление и формирование дифференциального выхода, а также подавление высокочастотных помех с помощью антиалиасингового фильтра. Далее сигнал оцифровывается встроенным аналого-цифровым преобразователем микроконтроллера и передается для обработки. На этом этапе выполняется вычисление гармонических составляющих спектра, интегральных характеристик и компонент широкополосной непрерывной составляющей, которые рассматриваются как информативные показатели интенсивности кавитации.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает комплексную обработку и визуализацию данных. В режиме реального времени отображаются спектры кавитационного шума и динамика изменения спектральных компонент, вычисляются статистические характеристики сигнала. Интерфейс программы имеет вкладочную структуру, что упрощает работу оператора: управление параметрами

регистрации, задание координатных областей сканирования и отображение результатов разделены по функциональным модулям.

Интеграция индикатора с системой позиционирования расширяет исследовательские возможности установки. Система позиционирования обеспечивает перемещение датчиков кавитации по трем координатам и используется для формирования пространственных распределений исследуемых параметров. Конструкция выполнена на основе шаговых двигателей и линейных направляющих, что обеспечивает жесткость и точность перемещений в рабочей области $25 \times 20 \times 20$ см. Управление реализуется через контроллер, поддерживающий микрошаговый режим и команды в формате G-кода.

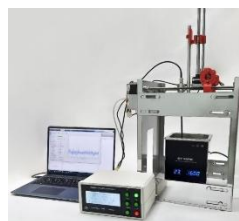


Рисунок 1 – Общий вид установки

Оператор задает плоскости сканирования, шаг и скорость перемещения датчика. Работа возможна в двух режимах: пошаговом, применяемом для построения трехмерных карт кавитационного поля, и непрерывном, обеспечивающем ускоренное сканирование больших областей. В процессе сканирования одновременно может регистрироваться информация о двенадцати спектральных компонентах, что позволяет получать разносторонние характеристики кавитационного поля. Интеграция с программным обеспечением спектрально-акустического индикатора обеспечивает автоматизацию эксперимента и формирование массивов данных для построения карт распределения кавитационной активности.

В качестве примера, демонстрирующего возможности установки, на рисунке 2 представлен результат сканирования кавитационной области под погружным излучателем в водопроводной воде. Диаметр излучающей поверхности – 15 мм.

Генерация кавитации в установке может осуществляться двумя способами.

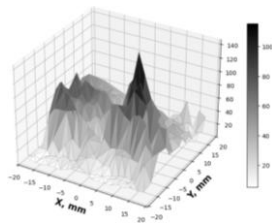


Рисунок 2 – Амплитуда субгармоники спектра в горизонтальной плоскости на расстоянии 5 мм от излучателя

Для локальных исследований используется погружной ультразвуковой излучатель с резонансной частотой 22 кГц, позволяющий формировать кавитационное поле вблизи рабочего торца. Для объемных экспериментов применяется

ультразвуковая ванна, создающая равномерное возбуждение в большом объеме жидкости. Такая конфигурация обеспечивает гибкость постановки экспериментов и возможность выбора условий в зависимости от исследуемых задач.

Стабильность параметров эксперимента поддерживается системой термостатирования, включающей циркуляционный термостат с точностью регулирования $\pm 0,5$ °С. Контроль температуры необходим, поскольку вязкость и упругие свойства жидкости существенно влияют на развитие кавитационных процессов. Использование термостатирования обеспечивает воспроизводимость измерений и корректность сравнения спектральных и пространственных характеристик, полученных в различных сериях экспериментов.

УДК 614.8

ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ О ПОЖАРЕ

Мисюкевич Н. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Обоснованы подходы по снижению количества ложных сообщений о пожаре для минимизации негативных последствий нарушения нормального режима жизнедеятельности.

Ключевые слова: пожар, доминирующий фактор, опасность, извещатель, оповещение, сигнал.

POSSIBILITY TO REDUCE FALSE FIRE ALARMS

Misiukevich M. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Approaches to reducing the number of false fire reports in order to minimize the negative consequences of disruption to normal life are substantiated.

Keywords: fire, dominant factor, danger, detector, notification, signal.

*Адрес для переписки: Мисюкевич Н. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Misiukevitch@mail.ru*

Системы передачи извещений о пожаре фиксируют более 99 % ложных сигналов в общем потоке сообщений. Поэтому снижение процента ложных срабатываний является весьма актуальной задачей. Необходимо учитывать доминирующий опасный фактор пожара (ОФП) при выборе пожарных извещателей по СН 2.02.03-2019 [1]. В данных приложения П к СН 2.02.03-2019 [1] содержатся от двух до четырех видов различных автоматических пожарных извещателей для помещений определенного назначения без каких-либо указаний о порядке их выбора. К тому же в ряде случаев доминирующий ОФП в начальной стадии пожара может указывать на необходимость оборудования помещений иным видом автоматического пожарного извещателя, чем это приведено в приложении П [1]. Расчеты доминирующего ОФП для помещений с преобладающей пожарной нагрузкой в виде дерева и его компонентов показывают, что доминирующим ОФП в зависимости от геометрии помещений являются температура или недостаток кислорода (фактор, для определения которого нет автоматических пожарных извещателей). Ввиду этого измененная постсоветская тенденция на оборудование помещений не

тепловыми, а дымовыми извещателями, для объектов с преобладающей пожарной нагрузкой в виде дерева привела, с одной стороны, к уходу от учета доминирующего ОФП, с другой стороны, к росту ложных сигналов о пожаре.

Автоматические пожарные извещатели следует выбирать в зависимости от вида пожарной нагрузки, назначения помещения, доминирующего фактора пожара в начальной стадии, высоты помещения, условий окружающей среды, возможных источников ложных срабатываний в контролируемой зоне.

При определении доминирующего ОФП учитываются пожарная нагрузка, высота помещения, условия окружающей среды.

Доминирующий ОФП определяют по формулам 25–28 приложения 2 к ГОСТ 12.1.004-91 [2].

Формирование команды на управление системами вытяжной противодымной вентиляции и (или) оповещения и управления эвакуацией при пожаре, автоматическими установками пожаротушения, а также технологическим, электротехническим и другим оборудованием следует предусматривать не менее чем от двух автоматических пожарных извещателей одной группы или двух

автоматических пожарных извещателей разных групп системы пожарной сигнализации (СПС), размещаемых в одной зоне контроля. В этом случае каждую точку защищаемой поверхности зоны необходимо контролировать не менее чем двумя автоматическими пожарными извещателями.

Допускается предусматривать формирование команды на управление оповещением о пожаре от одного автоматического пожарного извещателя при применении оборудования с функциями, повышающими достоверность обнаружения пожара (адресный автоматический пожарный извещатель либо неадресный с функцией верификации, что должно быть подтверждено эксплуатационными документами на оборудование). При этом для систем оповещения СО-4, СО-5 должны быть соблюдены условия п.12.3 СН 2.02.03-2019 [1].

Контроль каждой точки защищаемой поверхности зоны не менее чем двумя автоматическими пожарными извещателями является действенным для предотвращения ложных срабатываний систем. Оперативный персонал начинает действия при формировании СПС сигнала «ВНИМАНИЕ» от одного автоматического пожарного извещателя в зоне. Сигнал «ПОЖАР» формируется лишь при одновременном сообщении от двух автоматических пожарных извещателей в одной зоне. Допущение включения систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре от одного автоматического пожарного извещателя привело на практике к неверию людей в истинность передаваемых автоматикой сообщений и потере оперативности действий людей по сигналам пожарной автоматики.

Внеплановое техническое обслуживание должно проводиться при выдаче системой пожарной автоматики трех и более произвольных (ложных) срабатываний в одной и той же зоне контроля в течение календарного месяца (30 календарных дней) (п. 14 Требований [3], п. 4.5 ТКП 316-2011) [4]. Поступление трех ложных сигналов о срабатывании пожарной автоматики за месяц с одного объекта вызывает сомнения у надзорных органов в качестве технического обслуживания. При этом чаще всего игнорируется такой показатель работы автоматического пожарного извещателя как средняя наработка на отказ, то есть среднее время, за которое автоматический пожарный извещатель может выдать ложный сигнал, который не соответствует показателям контролируемой им среды. С учетом величины объекта и количества извещателей это тем существеннее, чем большее количество автоматических пожарных извещателей в СПС.

Формирование команды на управление технологическим, электротехническим и другим оборудованием, блокируемым с пожарной автоматикой по пп. 5.12, 15.2 (перечисления, а) и в)), 15.3 СН 2.02.03-2019 [1], допускается предусматривать от одного автоматического пожарного извещателя, если это не нарушит функционирование объекта в случае ложного срабатывания.

При защите помещений автоматическими установками пожаротушения (АУП) и СПС временно включение технических средств систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре следует предусматривать от АУП и СПС соответственно (п.15.4 СН 2.02.03 2019) [1].

Задержка оповещения людей о пожаре допустима, если оставшееся время достаточно для их безопасной эвакуации, что определяется на основании расчетов (п.12.12 СН 2.02.03-2019) [1]. Расчетное время задержки может быть использовано оперативным персоналом для выяснения действительной обстановки. При этом следует учесть, с одной стороны, что самая неблагоприятная обстановка складывается при появлении ОФП в коридоре здания, так как за время достижения в коридоре ОФП критического значения все люди из выходящих в этот коридор помещений должны выйти за пределы коридора. С другой стороны, можно задерживать начало оповещения в помещениях при срабатывании в них СПС, если коридор является отдельной зоной (оборудован отдельным шлейфом СПС).

Во многом возможность снижения количества выдаваемых сообщений о пожаре при ложных срабатываниях систем пожарной автоматики в процессе эксплуатации зависит от принятых проектных решений и применяемых технических средств. Современные технические средства обладают широкими возможностями по изменению необходимых параметров в процессе эксплуатации. Для сокращения количества ложных сигналов о пожаре можно выделить следующие направления:

- для помещений с большим количеством автоматических пожарных извещателей формировать результирующий сигнал о пожаре прибором приемно-контрольным пожарным при обнаружении пожара более чем двумя извещателями;
- при выделении автоматических пожарных извещателей в коридоре в отдельную зону задерживать начало оповещения людей о пожаре до появления ОФП в коридоре или подтверждения факта пожара в выходящих в этот коридор помещениях дежурным персоналом;
- оборудовать здание средствами видеонаблюдения, по крайней мере в коридорах, и использовать их оперативным (дежурным) персоналом для подтверждения факта пожара в пределах времени на задержку начала оповещения людей о пожаре и выдачи сигнала на системы передачи извещений о пожаре.

Литература

1. СН 2.02.03-2019. Пожарная автоматика зданий и сооружений. – Введ. 01.01.2025. – Мн.: Нац. фонд ТНПА Респ. Беларусь, 2025. – URL: <http://www.tnpra.by> (дата обращения: 19.09.2025).
2. ГОСТ 12.1.004-91*. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 01.01.2025. – Мн.: Нац. фонд ТНПА Респ. Беларусь, 2025. – URL: <http://www.tnpra.by> (дата обращения: 19.09.2025).

3. Требования к выполнению работ и (или) оказанию услуг по проектированию, монтажу, наладке и техническому обслуживанию систем пожарной сигнализации, систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, систем противодымной вентиляции, установок пожаротушения автоматических: утв. постановлением Совмина Респ. Беларусь от 10.04.2023 № 234. – Мн.: МЧС Респ. Беларусь, 2025. – URL: <https://rcce.mchs.gov.by> (дата обращения: 19.09.2025).

4. ТКП 316-2011. Система технического обслуживания и ремонта автоматических установок пожаротушения, систем противодымной защиты, пожарной сигнализации, систем оповещения о пожаре и управления эвакуацией. Организация и порядок проведения работ. – Введ. 01.01.2025. – Мн.: Нац. фонд ТНПА Респ. Беларусь, 2025. – URL: <http://www.tnppa.by> (дата обращения: 19.09.2025).

УДК 621.9.04

КОМПЛЕКСНАЯ АРХИТЕКТУРА УСТАНОВОК FLIP-CHIP МОНТАЖА: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ

Россоловский А. Ю., Щербакова Е. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Монтаж кристаллов методом Flip-Chip является важным методом в производстве изделий микроэлектроники. В работе представлены конструктивные особенности технологического оборудования для обеспечения технологического процесса Flip-Chip монтажа.

Ключевые слова: flip-chip, монтаж кристаллов, приводная система, контактные площадки, точность.

COMPLEX ARCHITECTURE OF FLIP-CHIP ASSEMBLY SYSTEMS: DESIGN SOLUTIONS, PRECISION ISSUES

Rossolovsky A. Yu, Sherbakova E. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Flip-chip assembly is an important method in microelectronics manufacturing. This paper presents the design features of the process equipment used to support the flip-chip assembly process.

Keywords: flip-chip, crystal assembly, drive system, contact pads, manufacturing precision.

*Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ens@tut.by*

Введение. Монтаж кристаллов с использованием Flip-Chip метода является сложным технологическим процессом и заключается в присоединении полупроводникового кристалла интегральной схемы активной стороной вниз, непосредственно на контактные площадки корпуса [1]. Соединение кристалла и корпуса происходит за счет металлических шариков (бампов) или столбиков металла (выполненных из золота или меди), проводящего полимера, а также самих металлических контактных площадок. Данный метод помогает производить интегральные микросхемы с высокой плотностью монтажа, низким сопротивлением соединений и улучшает глобальный процесс миниатюризации изделий за счет матричного расположения контактных площадок и минимальной протяженности соединений между корпусом и присоединяемым кристаллом. Реализация технологического процесса требует высокой точности и согласованности между рабочими механизмами оборудования.

Особенности технологического оборудования. Монтаж кристаллов методом Flip-Chip может производиться с использованием ручного, полуавтоматического и автоматического оборудования. В зависимости от выбранного вида инженерные установки будут иметь свои конструктивные особенности.

В случае ручного исполнения большинство операций будет выполнять оператор установки, а также

исполнение технологической машины будет самым простым. Рабочими узлами такой установки являются: корпус (где размещаются все механизмы), головка присоединения кристалла на приводной системе (минимум две координаты), место присоединения кристалла (нагревательный столик с возможностью ручного перемещения по направляющим), оптическая система совмещения кристалл-корпус, блок управления с персональным компьютером (ПК). Установки такого типа обычно выполняются в настольном варианте. В рабочем цикле оператор сам переворачивает кристалл, активной стороной вниз, используя специализированную оснастку (пинцет, вакуумный пинцет) и ориентирует его контур под инструментом головки присоединения кристалла. Далее управляя установкой, производит захват: при этом головка перемещается по минимум двум осям и вакуумным инструментом захватывает кристалл. Следующим этапом является расположение корпуса на нагревательном столике, также производится с помощью пинцета или дополнительной оснастки. После этого оператор начинает совмещать контактные площадки кристалла и корпуса за счет оптической системы: производится процесс механического выставления нагревательного столика с корпусом относительно захваченного на головке кристалла по шаблону, изображенному на экране ПК установки. Последним этапом происходит присоединение кристалла, за счет управления оператором ПК установки. Такой вид оборудования

не может решить всех проблем Flip-Chip монтажа и имеет множество недостатков. Во-первых, все зависит от размеров присоединяемых изделий. Если размеры кристаллов и корпусов будут менее $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$, то подготовка к монтажу, которую оператор производит руками приведет к большому количеству повреждений и брака. Также многое зависит от квалификации оператора и длительности рабочей смены, что также сказывается на качестве и количестве выпускаемых изделий. Однако самая большая проблема – это процесс совмещения кристалл-корпус. В зависимости от количества контактных площадок этот процесс усложняется, ведь оператор визуально на экране ПК установки определяет, насколько площадки кристалла и корпуса совпадают. При взаимодействии с количеством не более 10 площадок, данные установки могут быть хорошим решением, но со сложными изделиями работать не предоставляется возможным.

Полуавтоматические установки монтажа Flip-Chip намного превосходят исполнение ручного типа. В данном случае мы имеем согласованную систему, которая автоматизирует проблемные для человеческого фактора процессы. Рабочие узлы представляют из себя примерно тоже самое, что и в первом случае, но почти все из них дополнены приводными системами. Оператор также взаимодействует с кристаллами и корпусами с помощью технологической оснастки, однако только для загрузки и выгрузки их в установку. Все процессы перемещения производятся за счет приводных систем рабочего узла. Т. е. в данном случае оператор лишь управляет ими с помощью блока управления и ПК, перемещая в нужную точку. Координаты точек он видит на экране установки, может занести их в память, что сводит к минимуму вопрос точности переноса кристалла или корпуса под оптическую систему. Вопрос человеческой ошибки снижается, ведь механические перемещения осуществляют двигатели приводов (шаговые, серводвигатели, высокоточные линейные двигатели). А самое главное, что процесс совмещения также берет на себя программное обеспечение с небольшим участием оператора. Оптическая система с помощью технического зрения сама совмещает контактные площадки корпусов и кристаллов. Она устроена таким образом, что в момент совмещения между кристаллом и корпусом выдвигается оптическая призма, которая разделяет видеоканал системы и дает возможность видеть два изображения одновременно. Оператор видит расхождение между ними и доводит разницу с помощью приводом нагревательного столика или приводов рабочей головки установки, таким образом совмещая их в реальном времени, а не по компьютерному шаблону как в ручном варианте. Только при полном совпадении, установка дает оператору сигнал о возможности проведения процесса присоединения кристалла в корпус. Данный вид оборудования позволяет работать со всеми типами кристаллов и корпусов с большим количеством контактных площадок. Количество брака снижается,

т. к. минимизируются ошибки человеческого фактора. В данном случае неточности оператора и его действий скорее сводятся к неточностям механических перемещений двигателей и качеству оптической системы, но это несоизмеримые вещи. Недостатком данного вида установок является производительность, как и в первом случае, присоединение одного кристалла может занимать от нескольких десятков секунд до нескольких минут (в зависимости от количества контактных площадок).

Автоматические установки монтажа кристаллов Flip-Chip методом являются ведущим технологическим оборудованием в данной сфере. Данное оборудование представляет из себя массивные машины с крепким каркасом и основанием. Часто основания выполняют из толстых стальных плит или габбро-диабазы. Такой подход обусловлен минимизацией внешних воздействий на технологический процесс, гашение внешних и внутренних вибраций (от электронных блоков управления и механических перемещений мощных приводных систем). Установки имеют высокоточную приводную систему XYZF (3 координаты линейные и одна на угол поворота) рабочей головки, с погрешностью перемещений до 1 мкм по линейным координатам и до 1° по углу поворота. Также особенностью таких машин является добавлением механизмов для съема кристалла непосредственно с липкого носителя. Следующей особенностью является механизм переворота. Данный механизм позволяет автоматически переворачивать кристалл активной стороной вниз и передавать на рабочую головку. Технологический цикл можно представить следующим образом. Оператор загружает липкий носитель с кристаллами и групповую оснастку с корпусами в установку, а далее весь процесс монтажа происходит автоматически. Установка распознает каждый кристалл на липком носителе, далее происходит съем с помощью механизма подкола и механизма переворота. Механизм подкола выкалывает кристалл с липкого носителя, а механизм переворота вакуумом забирает его и переворачивает. Далее рабочая головка распознает перевернутый кристалл и снимает его с механизма переворота. Следующим этапом идет распознавание корпуса и само присоединение. Все процессы происходят за счет ПО установки. Машины оснащены техническим зрением и возможностью автоматического совмещения контактных площадок кристалл-корпус. Данный вид оборудования имеет недостатки в сложности его производства и стоимости. Все системы должны быть точно отлажены и синхронны. Только в этом случае возможен автоматический процесс монтажа кристаллов методом Flip-Chip.

Литература

1. Технологические особенности монтажа Flip-Chip / А. Ланин, И. Петухов, С. Волкенштейн // Силовая электроника. – 2010. – № 4. – С. 78–82.

УДК 62-526

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Савелов П. И., Щавлев А. А.

*РУП «НПЦ multifunctionальных беспилотных комплексов» НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

Аннотация. Работа систематизирует и сравнивает методы управления трехосевой гиросtabilизированной платформой оптико-электронной системы БПЛА на бесколлекторных электродвигателях. Рассматриваются ПИД-, линейно-квадратичное (LQR), H_∞ , модельно-прогнозирующее (MPC), нечеткое и адаптивное управление. Сравнение выполнено по метрикам линии визирования (СКО и пиково-пиковая ошибка), запасам устойчивости, вычислительным затратам, требованиям к модели и робастности к вибрациям. Предложена процедура выбора, включающая частотную идентификацию, формулирование требований и матрицу решений с учетом ограничений по массе, энергии и тепловому режиму.

Ключевые слова: гиросtabilизированная платформа; оптико-электронная система; стабилизация линии визирования; алгоритмы управления; беспилотный летательный аппарат.

CONTROL METHODS FOR ELECTRO-OPTICAL STABILIZATION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Savelov P., Shchavlev A.

RUE “SPC of Multifunctional Unmanned Systems” NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The paper systematizes and compares control methods for a three-axis gyro-stabilized electro-optical platform of a UAV driven by brushless motors. It examines PID, linear-quadratic (LQR), H_∞ , model predictive (MPC), fuzzy, and adaptive control methods. The comparison is carried out using line-of-sight metrics (RMS and peak-to-peak error), stability margins, computational load, model requirements, and robustness to vibrations. A selection procedure is proposed, including frequency-domain identification, requirement formulation, and a decision matrix considering mass, power, and thermal constraints.

Keywords: gyro-stabilized gimbal; electro-optical system; line-of-sight stabilization; control algorithms; unmanned aerial vehicle.

*Адрес для переписки: Савелов П. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savelov2205@gmail.com*

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются для всевозможных задач мониторинга, инспекций объектов инфраструктуры, картографирования, экологических наблюдений, решение которых реализуется при помощи аэрофото и видео съемки. Ключевым элементом получения видеоинформации являются гиросtabilизированные оптико-электронные системы (ГОЭС).

Типовая конструкция ГОЭС – гиросtabilизированная трехосевая платформа с карданной кинематикой, приводимая в движение бесколлекторными электродвигателями. В состав измерительного контура ГОЭС входят инерциальные датчики (трехосевые гироскопы и акселерометры). Задача закона управления формулируется как подавление угловых скоростей корпуса и компенсация квазистационарных дрейфов ориентации при учете ограничений на исполнительные приводы. При этом необходимо обеспечить заданные показатели качества стабилизации линии визирования (ЛВ) в рабочей полосе частот.

Цель данной работы является оптимизация выбора метода управления системой стабилизации гиросtabilизированных оптико-электронных систем.

ПИД-регулятор является наиболее распространенным алгоритмом систем стабилизации. Он формирует управляющий сигнал как сумму

трех компонентов: пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) частей ошибки системы (разницы между заданным и измеренным сигналом). Преимущество ПИД-регуляторов – возможность удобной настройки по известным эмпирическим или оптимизационным методам [1].

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) – метод оптимального управления для линейных систем с квадратичной функцией качества. В этом подходе стоимость задается как сумма квадратов отклонений переменных состояния и управляющих воздействий, а обратная связь по состоянию синтезируется таким образом, чтобы минимизировать эту функцию «затрат» [2]. Эффективность LQR может оказаться недостаточной в сложных многопараметрических системах или при выраженных нелинейностях, где преимущество получают робастные или адаптивные методы.

Методы синтеза H_∞ направлены на обеспечение гарантированной устойчивости и требуемой производительности системы при наличии неопределенностей. При этом задача оптимизации формулируется по принципу «худшего случая»: контроллер выбирают таким образом, чтобы воздействие наибольшего возмущения на выход системы было минимальным. Основным недостатком методов H_∞ – высокая сложность синтеза и жесткие требования к точности модели объекта. Кроме

того, оптимизация ведется по выбранному критерию, который не всегда согласуется с интуитивно понятными показателями качества системы (например, временем переходного процесса).

Тем не менее $H-\infty$ регуляторы в гиросtabilизированных платформах обеспечивают высокую робастность при неопределенностях параметров и внешних возмущениях, что критично для оптико-электронных систем, функционирующих в динамических условиях съемки [3].

Модельно-прогнозирующее управление (МРС) – современный метод управления, учитывающий предсказанное поведение системы. По заданной модели МРС предсказывает выходы системы на некотором горизонте и решает задачу оптимизации управления в каждый момент времени. При этом на каждом шаге реализуется только первая часть найденного оптимального управляющего воздействия, после чего процесс повторяется. МРС явно учитывает динамику системы и позволяет предсказывать влияние будущих изменений (например, предстоящих рывков или резких ускорений). Главный недостаток метода – высокие вычислительные требования для решения оптимизационной задачи в режиме реального времени, особенно если модель нелинейна и горизонт предсказания велик. Тем не менее в последние годы МРС активно внедряется благодаря росту вычислительных возможностей и появлению специализированных процессоров для быстрого решения задач оптимизации [4].

Нечеткие регуляторы используют теорию нечетких множеств для управления без явной математической модели. Входные сигналы (такие как ошибка и ее производная) преобразуются в лингвистические термины (например, «большая отрицательная ошибка», «малая ошибка»), после чего через систему правил формируется управляющий сигнал. Формальным вариантом является система Такэби-Сугэно-Канга (TSK), где правила задают выходные функции.

Преимуществом нечетких регуляторов является возможность интуитивного описания правил управления на языке эксперта, что упрощает разработку контроллера при сложной динамике объекта. Такой регулятор «анализирует» аналоговый вход при помощи логических переменных с непрерывными значениями от 0 до 1 [5].

Адаптивные алгоритмы автоматически изменяют свои параметры для компенсации изменений характеристик объекта или внешних условий. Например, в MRAC (Model Reference Adaptive

Control) задается эталонная модель желаемого поведения, и параметры регулятора настраиваются таким образом, чтобы поведение системы максимально совпадало с этой моделью [6]. Таким образом, адаптивные регуляторы целесообразно применять в ситуациях, где параметры объекта заранее неизвестны или меняются, а требования к точности управления высоки.

При этом важно обеспечить условия сходимости алгоритма и отсутствие устойчиво направленных возмущений. Кроме того, для любого метода управления необходима предварительная частотная идентификация (включая измерение резонансов по осям и оценку спектров помех и шумов) и периодическая переоценка модели объекта – обязательные этапы перед выбором и оптимизацией управляющего закона.

На практике именно согласованность динамических звеньев, качество датчиков и алгоритмов фильтрации, а также корректная настройка контуров управления определяют реальный результат. В этой связи целесообразно сочетать классические и современные методы – например, использовать ПИД-регулятор в сочетании с модельно-прогнозирующим или адаптивным контуром для компенсации внешних возмущений и параметрических дрейфов.

Основной задачей дальнейших исследований является создание единой методики оценки эффективности алгоритмов стабилизации на основе экспериментальных данных с реальных платформ. Разработка такой методики позволит повысить достоверность выбора управляющего закона, ускорить этап верификации и повысить надежность работы оптико-электронных систем в составе беспилотных комплексов.

Литература

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с.
2. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Ю.-Ши. Хо. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
3. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
4. Деменков, Н. П. Управление с прогнозированием: учеб. пособие / Н. П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – 66 с.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
6. Фомин, В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М.: Наука, 1981. – 447 с.

UDC 681

NEURAL NETWORK TECHNOLOGY FOR MANAGING BIG DATA IN ENERGY SYSTEMS

Savkova E. N., Dong M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Neural network technology is becoming a core tool for managing big data in energy systems, significantly improving the accuracy and efficiency of load forecasting, state estimation, and fault detection. Compared to traditional methods, architectures such as Physics-Informed Neural Networks and LSTM perform better in terms of prediction error, robustness, and real-time capability. These technologies have reduced operational costs and delivered rapid returns in multiple real-world cases. In the future, federated learning, quantum computing, and edge intelligence will further drive energy systems toward adaptive, low-latency, and distributed intelligent operations.

Keywords: big Data, Energy Systems, Smart Grid, Load Forecasting

*Address for correspondence: Dong M., 65 Nezavisimosti Ave., Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: 834509160@qq.com*

The deepening digital transformation of energy systems is generating vast amounts of heterogeneous data, posing significant challenges to traditional management methods. Neural network technology, particularly deep learning models, has become a key tool to address these challenges due to its powerful capabilities in pattern recognition, prediction, and optimization. Core Technical Advantages: Three Neural Network Models Demonstrating Their Strengths. Different types of neural networks play complementary roles in energy management:

Physics-Informed Neural Networks (PINNs): By directly embedding physical laws (such as power flow equations) into the model, PINNs combine data-driven learning with domain knowledge. Research shows that their accuracy in power system state estimation is over 83 % higher than traditional machine learning models, and they demonstrate a 93 % advantage in robustness against data manipulation attacks, making them particularly suitable for complex scenarios with limited measurement data.

Long Short-Term Memory Networks (LSTMs): Excelling at processing time-series data, LSTMs can effectively capture long-term dependencies in load and power generation. In short-term load forecasting, LSTMs can reduce the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) to around 3.29 %, significantly outperforming traditional statistical methods. They can also incorporate multiple variables like weather and economic indicators for forecasting. **Deep Neural Networks (DNNs):** Leveraging their deep architecture, DNNs can learn complex nonlinear relationships within energy data. In power loss management, through optimization scheduling, they can help reduce grid operational costs by up to 6.2 %.

Key Application Scenarios: Enhancing Grid Efficiency from Prediction to Optimization. These technologies have been successfully applied in several core areas: **State Estimation and Load Forecasting:** CNN and RNN models can process thousands of measurements per second, providing real-time system-wide state assessment in seconds, replacing traditional methods that took minutes. Accurate load forecasting provides a solid foundation for resource scheduling.

Fault Detection and Predictive Maintenance: CNNs analyzing waveform data achieve fault detection accuracy exceeding 95 %. LSTMs can predict failures weeks in advance by analyzing multi-source data like equipment vibration and temperature, enabling a shift from reactive response to proactive maintenance. **Renewable Energy Management and Loss Optimization:** Neural networks can accurately forecast the output of wind and solar power and optimize the charging/discharging strategies of battery energy storage systems accordingly. In loss management, the application of DNNs has already yielded annual savings of millions of dollars.

Implementation Challenges and Future Outlook.

Despite the promising prospects, deploying neural networks still faces challenges related to data quality, computational demands, cybersecurity, and model interpretability. Corresponding solutions, such as using Generative Adversarial Networks (GANs) to handle missing data, adopting distributed computing frameworks (like Spark) to accelerate training, and applying homomorphic encryption to ensure data security, are maturing.

Looking ahead, the field is evolving towards smarter, more distributed, and more secure solutions. Federated learning enables cross-institutional collaborative model training without sharing raw data; Quantum Neural Networks are expected to bring breakthroughs in complex optimization problems within the next 5–10 years; and the integration of 5G and edge computing will push intelligent decision-making closer to the network edge, enabling low-latency real-time control.

Conclusion. Neural network technology has proven to be a transformative force in managing big data for energy systems. It not only significantly surpasses traditional methods in accuracy and efficiency but also delivers substantial economic value through predictive maintenance and optimized scheduling. As the technology continues to evolve and integrate with emerging paradigms, neural networks will undoubtedly form the cornerstone for building smarter, more efficient, and more resilient future energy systems.

References

1. Jiawei, M. Research and application of multi-source information fusion technology based on big data in power system: master's thesis / M. Jiawei; Tianjin University of Technology. – 2019. – 98 p.
2. Chao, Yu. Research on real-time data acquisition and processing technology in electrical engineering automation

control systems / Yu Chao // Electrical Engineering Technology. – 2025. – № S1. – P. 358–360.

3. Juan, Min. Research on the development and application of power system dispatching automation technology / Min Juan // Southern Agricultural Machinery. – 2021. – Vol. 52, № 15. – P. 160–161.

УДК 681.785.57

АНСАМБЛЕВОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ТОЧНОГО АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Саечников И. В., Чернявская Э. А., Саечников А. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена интеграция ансамблевого машинного обучения в новый тип масштабируемого инструмента, основанного на чипе из тысяч оптических микрорезонаторов для анализа оптических спектров. Модель мод шепчущей галереи с использованием ансамбля LightGBM дополненную аугментацией на основе вариационного автоэнкодера обеспечивает спектральный анализ в видимом диапазоне с относительным разрешением до 10^{-6} .

Ключевые слова: оптический микрорезонатор, спектроанализатор, машинное обучение, ансамбль.

ENSEMBLE MACHINE LEARNING FOR PRECISE OPTICAL SPECTRUM ANALYSIS

Saetchnikov I. V., Tcherniavkaia E. A., Saetchnikov A. V.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents the integration of ensemble machine learning into a new type of scalable chip-based instrument consisting of thousands of optical micro-resonators for analyzing optical spectra. A whispering gallery model using the LightGBM ensemble, supplemented by augmentation based on a variational autoencoder, provides spectral analysis in the visible range with a relative resolution of up to 10^{-6} .

Keywords: optical micro-resonator, spectrum analyzer, machine learning, ensemble.

Адрес для переписки: Саечников А. В., ул. Курчатова 1, г. Минск 220045, Республика Беларусь

e-mail: asaetchnikov@bsu.by

Контроль оптического излучения играет важнейшую роль во многих научных и промышленных задачах. Особую значимость данные инструменты приобретают в динамично развивающейся области квантовых технологий, где требуется высокая точность измерений и строгий контроль длины волны для реализации квантовых вычислительных процессов, систем передачи информации и высокочувствительных сенсоров. Предложенная модель инструмента спектрального анализа оптического излучения включает набор оптических микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ) [1–4]. Он использует мультиплексную визуализацию тысяч микрорезонаторов [1, 2] для генерации уникальных шаблонов для оптического излучения. Для идентификации длины волны в модель были интегрированы ансамблевые методы бустинга LightGBM и сверточные нейронные сети (CNN), показавшие ранее высокую эффективность при распознавании образов и определении параметров объектов на многопараметрических данных [5, 6].

Представленная модель основывается на изначальном возбуждении расщепления мод шепчущей галереи в полимерных микросферах, что обеспечивает формирование уникальных спектральных изображений. За счет интеграции тысяч микрорезонаторов на одном чипе и их последующего мультиплексированного считывания достигается

высокая чувствительность (около 100 фемтометров), при этом устройство остается компактным и легко интегрируемым. Для оценки эффективности расщепления мод и определения длины волны использовались смоделированные спектральные данные с разной степенью деформации микросфер, вызывающей расщепление резонансных пиков. Каждый набор данных включал отклики 200 микрорезонаторов в диапазоне 1,2 нм с разрешающей способностью 0,3 пм. Анализ выявил, что точность определения возрастает с увеличением числа микрорезонаторов, а наличие расщепления мод повышает точность по сравнению с дегенерированными резонансами. В ходе исследования был определен оптимальный уровень расщепления – 1,2 %, который обеспечивает максимальную точность при минимальном количестве микрорезонаторов.

Реализация определения длины волны рассматривалась как задача регрессии с помощью методов на основе решающих деревьев или глубокого обучения. Вертикальная проекция шума детектора в спектре и горизонтальная проекция теплового шума создавали дополнительную сложность при предобработке данных, что, в свою очередь, делало выбор глубоких нейронных сетей менее предпочтительным для прогнозирования длины волны. Таким образом, для рассмотрения были выбраны ансамблевые методы бустинга основанные на решающих дере-

вьях. Вследствие отсутствия категориальных признаков в качестве основного метода был выбран оптимизированный LightBoost ускоряющий обучение за счет выборки по градиентам и объединения взаимно исключающих признаков, что особенно релевантно при ограниченности предобработки данных.

Настройка ансамблевого метода была направлена на определение оптимального числа итераций бустинга с максимальным значением, установленным в 1000. Скорость обучения, количество листьев, максимальная глубина дерева решений, а также параметры регуляризации L1 и L2 оптимизировались на основе результатов 5-кратной кросс-валидации. Это обеспечивает всестороннее покрытие всех доступных длин волн и, таким образом, повышает релевантность настройки. Дерево ансамбля строилось до тех пор, пока оно не достигнет максимальной глубины или не сможет найти оптимальное разбиение. Для повышения устойчивости модели количество листьев устанавливается на значение, существенно меньшее степени двойки, возведенной в максимальную глубину. Для достижения баланса между максимальной глубиной дерева и количества листьев, оптимизировался параметр задающий минимальное количество наблюдений, необходимых в узле-листе. Для дальнейшего снижения риска переобучения применялась регуляризация L1 и L2. Процесс обучения продолжался до тех пор, пока не было достигнуто максимальное число итераций бустинга или в течение последних 50 итераций не фиксировалось улучшение производительности на валидационной выборке.

В следствие ограниченности экспериментальных данных для дополнительной аугментации интерпретатор длины волны включал вариационный автоэнкодер. Энкодер состоял из пяти модулей, каждый из которых включает сверточный слой, за которым следует функция активации LeakyReLU. Количество фильтров удваивается на каждом последующем слое и составляло таким образом 32, 64, 128, 256 и 512. Размеры ядра, шага (stride) и заполнения (padding) оптимизировались для достижения последовательного уменьшения размера входных данных вдвое на каждом шаге. В процессе сжатия данных на сверточных слоях размер свертки был уменьшен для облегчения обработки локальных паттернов и извлечения тонких структурных особенностей данных. Сверточные модули дополнялись двумя полносвязными слоями в латентном пространстве размерностью 2000. В свою очередь декодер состоял из пяти модулей транспонированных сверточных слоев с активацией LeakyReLU и фильтрами размером 512, 256, 128, 64 и 32. Параметры ядра, пулинг и шаг настроены

соответственно использованным на уровнях энкодера: первый сверточный слой энкодера использует те же параметры, что и последний слой декодера, и так далее. Вариационный автоэнкодер обучался 150 эпох оптимизатором на минимизацию кумулятивную функцию потерь на базе ошибки реконструкции по среднеквадратическому отклонению и регуляризационной ошибки по KLD с адаптивным параметром β 0.005.

Экспериментальная эффективность подхода исследовалась на основе чипа с 5563 микросферами, где для согласованности с результатами моделирования, диапазон прогнозирования был ограничен 1.2 нм, и включал 2352 циклов измерений. Для оценки точности регрессионной модели было сформировано 30 случайных подмножеств микрорезонаторов в количестве от 0 до 100 из всего доступного набора. Результаты продемонстрировали преимущество чипа с расщепленными спектрами по сравнению с узкими и прямыми независимо от количества микрорезонаторов. Было показано, что при увеличении числа резонаторов с расщепленными спектрами до 100 медианная точность достигает 80 фемтометров, при этом 95 % значений находятся в пределах 0,4 пикометра. При увеличении числа резонаторов до 200, 95-й перцентиль смещается до уровня в 0,2 пикометра превосходя таким образом разрешающую способность спектрометра.

Литература

1. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency / A. V. Saetchnikov [et al.] // Opto-Electronic Advances. – 2020. – Vol. 3. – P. 200048.
2. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early-stage classification of dynamical variations / A. V. Saetchnikov [et al.] // Advanced Photonics Research. – 2021. – Vol. 7. – P. 2100242.
3. Detection of per-and polyfluoroalkyl water contaminants with multiplexed 4D microcavities sensor / A. V. Saetchnikov [et al.] // Photonics Research. – 2023. – Vol. 11. – P. A88–A98.
4. Two-photon polymerization of optical microresonators for precise pH sensing / A. V. Saetchnikov [et al.] // Light: Advanced Manufacturing. – 2024. – Vol. 5, № 54. – P. 1–10.
5. Saetchnikov, I. Deep Neural Network-Based Dynamical Object Recognition and Robust Multiobject Tracking Technique for Onboard Unmanned Aerial Vehicle's Computer Vision-Based Systems / I. Saetchnikov, E. Tcherniavskaia, V. Skakun // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2023. – Vol. 4, № 3. – P. 250–256.
6. Saetchnikov, I. Object detection for unmanned aerial vehicle camera via convolutional neural networks / I. Saetchnikov, E. Tcherniavskaia, V. Skakun // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 98–103.

УДК 621.317.4; 621.317; 621.317.3

АЛГОРИТМЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЦИФРОВЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ

Скурту И. Т.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается необходимый и достаточный набор характеристик для цифрового воспроизведения магнитных свойств магнитомягких материалов в рамках создания цифровых стандартных образцов для целей метрологического обеспечения магнитных измерений. Приведен алгоритмический подход к разработке цифрового стандартного образца на основе высокостабильных программируемых синхронизируемых генераторов сигналов произвольной формы.

Ключевые слова: цифровой стандартный образец, магнитомягкие материалы, магнитные свойства.

ALGORITHMS FOR REPRODUCING MAGNETIC PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC MATERIALS IN DIGITAL REFERENCE MATERIALS

Skurtu I. T.

*The Institute of applied physics of the National academy of sciences of Belarus,
Minsk, Belarus*

Abstract. The necessary and sufficient set of characteristics for digital reproduction of magnetic properties of soft magnetic materials is considered within the framework of creation of digital reference materials for the purposes of metrological support of magnetic measurements. Algorithmic approach to development of digital reference material based on highly stable programmable synchronized generators of arbitrary waveform signals is presented.

Keywords: digital reference material, soft magnetic materials, magnetic properties.

*Адрес для переписки: Скурту И. Т., ул. Академическая 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: skurtu.it@gmail.com*

Измерения магнитных свойств магнитомягких материалов имеют на порядок больший бюджет неопределенности по сравнению с измерениями электрических величин, вследствие более сильного влияния на результат измерения температуры образца, механических напряжений в нем, а также чувствительности образца к магнитной «истории» – предыдущим траекториям перемагничивания. Дополнительную неопределенность вносит реактивный характер нагрузки (выходные цепи усилителей мощности стабильнее работают на активную нагрузку), чувствительность к внешним электромагнитным полям и электромагнитная (не)совместимость частей измерительной системы.

Обеспечение одинаковых условий измерения очень важно для передачи размера единиц удельных магнитных потерь и амплитуды магнитной индукции при калибровке магнитоизмерительного оборудования (рабочих средств измерения), а также при проведении межлабораторных сравнений оборудования высшей точности.

В отличие от существующих калибраторов электрических сигналов, с помощью которых можно обеспечивать качество работы электрических измерительных трактов, стандартный образец магнитных свойств «обеспечивает работой» также и алгоритмы цифровой обработки сигналов. В идеальных условиях эти алгоритмы должны обеспечить точность измерения магнитных величин, равную точности измерения электрических сигналов с первичных преобразователей магнитных свойств, однако в силу вышеуказанных причин, этого не происходит.

Дополнительным фактором сложности являются и тот факт, что, например, пластины

Эпштейновского образца при повторяющихся (десятки раз) закладках и выемках значительно меняют свои долговременные магнитные свойства.

Для приближения точности передачи магнитных величин к точности передачи электрических целесообразно использовать цифровые стандартные образцы (ЦСО) магнитных свойств.

Измерение магнитных характеристик прежде всего требует высокой точности измерения мгновенных значений, поскольку нелинейная зависимость между величиной внешнего магнитного поля и магнитной индукцией приводит к несинусоидальным сигналам в измерительных трактах.

К метрологически значимым характеристикам электротехнической стали, которые подлежат контролю, относятся удельные магнитные потери при фиксированной амплитуде магнитной индукции, а также амплитуда магнитной индукции при фиксированной амплитуде магнитного поля. Эти две характеристики определены на фиксированной частоте перемагничивания. Чаще всего это 50 или 60 Гц, реже 400 Гц.

Вся информация о поведении магнитомягкого материала в режимах стационарного динамического перемагничивания содержится в семействе петель магнитного гистерезиса, которые можно представить, как поверхность уровня (удельных магнитных потерь или индукции) рисунок 1 [1].

Формализация движения по гистерезисной поверхности начинается с многомерной интерполяции серии результатов измерений на стандартных образцах, изготовленных из магнитомягких материалов (электротехнических сталей, нанокристаллических сплавов, ферритов и др.). Серия должна охватывать

диапазон от низких полей (область Рэлея) до технического насыщения (обычно, не более 2 Тл).

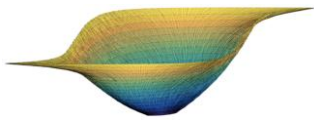


Рисунок 1 – Семейство петель магнитного гистерезиса в виде поверхности уровня (удельных магнитных потерь или амплитуды магнитной индукции)

Интерполяция в пространстве петель магнитного гистерезиса является самостоятельной алгоритмической задачей, решение которой позволяет метрологически корректно преодолеть ограничения разрешающей способности цифроаналоговых преобразователей (программируемых генераторов сигнала произвольной формы). Например, если необходимо измерить удельные магнитные потери при амплитуде магнитной индукции 1,7 Тл, но при этом в силу нелинейности материала и дискретности ЦАП, достижимы точки 1,699 Тл и 1,701 Тл, петля магнитного гистерезиса, соответствующая уровню 1,7 Тл может быть получена посредством нелинейной многомерной интерполяции петель на 1,699 Тл и 1,701 Тл. Поведение интерполяционных алгоритмов на различных участках петель оценивается и корректируется исходя из данных на стадии предварительного измерения [1, 2], которая позволяет получить быструю оценку нелинейности материала во всем диапазоне полей перемагничивания – рисунок 2.

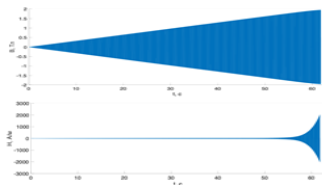


Рисунок 2 – Обращенные эпюры сигналов магнитной индукции (верхний график) и магнитного поля (нижний график) на аппарате Эпштейна при медленном размагничивании

Геометрически эти данные представляют собой спираль, принадлежащую гистерезисной поверхности. Для того, чтобы из приведенных данных получать линии уровня поверхности (соответствующие циклам стационарного динамического перемагничивания), необходимо выбрать в качестве третьей пространственной координаты амплитуду магнитной индукции, которая в процессе размагничивания линейно изменяется во всем своем диапазоне.

Метрологическая эквивалентность цифрового стандартного образца магнитных свойств достигается не за счет точного воспроизведения свойств материала, но за счет сохранения уровня нелинейности для амплитудных и фазовых соотношений между сигналами магнитного поля и магнитной индукции. В этой связи допустимо сохранять в памяти образца гистерезисную поверхность, совпадающую с таковой у исходного материала с точностью до линейного преобразования.

При необходимости точного воспроизведения магнитных свойств материала, калибровочное линейное преобразование для гистерезисной поверхности, представленной спиральной линией, можно получить из данных прецизионных измерений магнитных свойств образца в любой точке кривой намагничивания.

Таким образом, в процессе медленного размагничивания образцов магнитомягких материалов может быть получена необходимая и достаточная информация для создания цифрового стандартного образца магнитных свойств на основе высокостабильных программируемых синхронизируемых генераторов сигналов произвольной формы.

Литература

1. Скурту, И. Т. Гистерезисные поверхности как инструмент повышения точности магнитных измерений / И. Т. Скурту, А. С. Ерошенко, И. И. Брановицкий // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2021. – № 1. – С. 5–10.
2. Скурту, И. Т. Прикладные вопросы создания цифровых стандартных образцов магнитных свойств магнитомягких материалов. Часть 1 / И. Т. Скурту, И. И. Брановицкий // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2022. – № 4. – С. 20–24.

УДК 621 384 3

MEMS ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ SRR И E-LC МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Таратын И. А.^{1,2}, Кернасовский Ю. М.², Филатов С. А.^{1,3}, Сафрошкина И. В.², Долгих М. Н.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт радиоматериалов НАН Беларуси»

³ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются конструкции и особенности реализации чувствительных элементов термоэлектрических датчиков терагерцового и СВЧ диапазона на основе метаповерхностей с резонансными структурами (разрезные сплит-кольца, Split-Ring Resonator, E-LC).

Ключевые слова: МЭМС, MEMS, сенсоры, SRR.

MEMS SENSORS ON SRR AND E-LC METASURFACES BASED

Taratyn I. A.^{1,2}, Kernasovsky Y. M.², Filatov S. A.^{1,3}, Safroshkina I. V.², Dolgikh M. N.³¹Belarusian National Technical University²State Scientific Institution "Institute of Radio Materials of the National Academy of Sciences of Belarus"³GNU "Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The design and implementation feature of sensitive elements of thermoelectric sensors of the terahertz and microwave ranges based on metasurfaces with resonant structures (split-rings, Split-Ring Resonator, E-LC) are considered.

Keywords: MEMS, SRR, sensor, termopile.

Адрес для переписки: Филатов С. А., Минск, ул. П.Бровки, 15, Республика Беларусь

e-mail: fil@hmti.ac.by

Преобразователи излучения с поглощающей метаповерхностью используют метаматериалы для эффективного поглощения и преобразования электромагнитного излучения в электрический сигнал. Современные исследования в этой области направлены на повышение эффективности и расширение спектрального диапазона работы преобразователей. Создание преобразователей оптического и терагерцового излучения с многоэлементными тонкопленочными термоэлектрическими элементами и поглощающей метаповерхностью представляет собой сложную задачу, требующую интеграции технологий и тщательного выбора материалов [1, 2].

Ключевыми проблемами при создании таких преобразователей является выбор оптимального типа многоэлементных тонкопленочных термоэлектрических преобразователей с учетом технологических возможностей современного микроэлектронного производства, так как материалы должны поддерживать методы магнетронного напыления и CVD процессов. Многоэлементная структура преобразователя позволяет увеличить выходное напряжение и его чувствительность при использовании фотолитографии для создания микроструктур. Использование классических термоэлектрических материалов с высоким коэффициентом добротности (ZT), такие как Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , или их композиты в тонкопленочном исполнении ограничено, но тонкопленочные элементы позволяют минимизировать тепловые потери и улучшить эффективность и скорость преобразования.

Применение в чувствительной области преобразователей метаповерхностей с резонансными структурами (разрезные сплит-кольца SRR, Split-Ring Resonator, E-LC) обеспечивает максимальное поглощение энергии излучения в заданном диапазоне частот (оптическом или терагерцовом [3,4]). При этом материалами для формирования метаповерхности для оптического диапазона чаще всего являются металлы с высокой проводимостью (золото, серебро) и диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (кремний). Для терагерцового диапазона могут быть использованы и проводящие материалы типа графена [5]. Критически важным является согласование оптических и тепловых свойств метаповерхности и термоэлектрических элементов необходимое для уменьшения шумов и повышения чувствительности преобразователей.

Метаповерхность для поглощения электромагнитного излучения терагерцового диапазона

диапазоне частот (0,1–50 ТГц), может быть, реализована благодаря созданию SRR резонансных контуров, которая максимизирует поглощение и минимизирует отражение и передачу излучения. Это реализуется благодаря резонансной структуре на диэлектрическом слое, расположенном над металлической поверхностью.

Расчет метаповерхности для поглощения терагерцового включает этапы выбора материалов и проектирования структуры с использованием численного моделирования и оптимизации в среде CST Microwave Studio, COMSOL Multiphysics или Lumerical FDTD. Для расчета поглощения в терагерцовом диапазоне метаповерхностью образованной повторяющейся структурой из разрезных квадратных колец (SRR, Split-Ring Resonator) на диэлектрике над металлом нужно определить ее электромагнитные свойства, включая коэффициент отражения и прохождения, а затем рассчитать коэффициент поглощения $A = 1 - R - T$, рисунок 1.

Метод расчета включает использование методов компьютерного моделирования, таких как метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD), которые учитывают геометрию метаповерхности, диэлектрические свойства материалов и параметры падающего излучения. В простейшем случае резонансная частота f_{res} для SRR, может быть рассчитана по формуле

$$f_{\text{res}} = 1 / (2\pi\sqrt{LC}), \quad (1)$$

где L – индуктивность, а C – емкость контура. Для кольцеподобных структур, лежащих в одной плоскости, с диаметрально противоположным расположением зазоров индуктивность эквивалентного контура [6–8]

$$L = 2,43 \cdot \Delta x \cdot \mu_0 \left\{ \ln \left[\frac{0,98}{w+t} \right] - 1,84 \frac{w+t}{\Delta x} \right\}, \quad (2)$$

емкость эквивалентного контура:

$$C = \varepsilon_0 \left\{ 1 + \arctg \left[\frac{h_\varepsilon(\varepsilon-1)}{2\pi(w+t)} \right] \right\} * \frac{K \sqrt{1-\Delta z^2}}{K[\Delta z]}, \quad (3)$$

где:

$$\Delta z = \frac{w}{w+2t}, \quad (4)$$

$$R_c = \frac{\rho_c}{h \cdot t} \cdot \frac{L}{\mu_0}, \quad (5)$$

$$R_d = \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{w \Delta x}{h_\varepsilon l(\Delta x - t)}, \quad (6)$$

где h_ε – толщина диэлектрической подложки; ε – относительная диэлектрическая проницаемость подложки; R_c – сопротивление эквивалентной электрической цепи, R_d – сопротивление эквивалентной

электрической цепи, связанное с потерями в подложке; $K[\Delta z]$ – интеграл Лежандра 1-го рода:

$$K[\Delta z] = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \Delta z^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (7)$$

Экспериментальные образцы преобразователей излучения с поглощающей метаповерхностью реализованы как кристаллы поликристаллического кремния, легированного бором, с изолирующим слоем нитрида кремния толщиной 1 мкм и термоэлектрическими элементами из Al - poly-Si (алюминий-поликремний), на поверхности которых сформированы метаповерхности из SRR элементов Ti-Au-Ti-SiO_2 (рисунк 1–2) или E-LC элементов (рисунк 3). «Холодные» спаи термоэлементов находятся на периферийной части, «горячие» спаи термоэлементов размещены в центре кристалла.

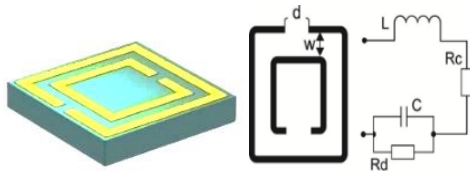
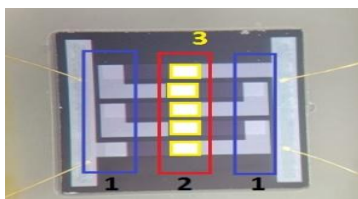


Рисунок 1 – Схематическая модель SRR элемента метаповерхности и его эквивалентная схема

Для метаповерхности резонансная частота ω_0 зависит не только от характеристик материалов, но и от геометрии проводников и соседних элементов, которые влияют на значения эквивалентной индуктивности L и емкости C . В частности, уменьшение ширины проводника уменьшает площадь токового контура и уменьшает эффективную индуктивность, а диэлектрическая подложка изменяет L и C за счет потерь и распределения поля.

Эффективность поглощения энергии электромагнитного излучения метаповерхностью может быть описана эффективной добротностью поверхности (Q-фактором). Для тонких металлических слоев, меньших толщины скин-слоя на данной частоте, сопротивление проводящих дорожек возрастает, что приводит к увеличению омических потерь и снижению добротности (Q-фактора), а полоса поглощения расширяется.



1 – область «холодных» элементов термоэлементов,
2 – область «горячих» элементов термоэлемента,
3 – область метаповерхности над чувствительной областью термоэлементов

Рисунок 2 – Структура термоэлектрического многоэлементного преобразователя

Увеличение толщины металла может несколько снизить индуктивность за счет лучшего распределения тока по объему проводников, не изменяя величину емкости, если только толщина не становится сопоставимой с зазорами.

В режиме эффективной среды, когда размер резонатора значительно меньше рабочей длины волны, резонатор ELC можно качественно описать эквивалентной схемой, рисунок 4.

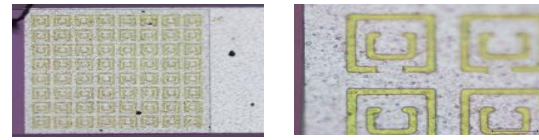


Рисунок 3 – Топологии и увеличенный фрагмент SRR метаповерхности для селективного поглощения терагерцового излучения

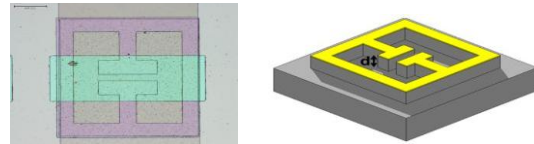


Рисунок 4 – Топологии E-LC метаповерхности на основе планарных LC-резонаторов для селективного поглощения СВЧ излучения над «горячим» спаем термоэлемента

Конденсаторная структура взаимодействует с электрическим полем и параллельно соединена с двумя контурами, создающими индуктивность цепи. Следует отметить, что ELC-резонатор (электромагнитный резонатор с замкнутой электрической связью) наиболее эффективно взаимодействует с электрическим полем плоской волны, когда вектор E волны ориентирован вертикально относительно щели в середине резонатора. Горизонтальная ориентация вектора E приводит к значительно более слабому взаимодействию, поскольку в этом случае он не индуцирует сильный резонансный ток в щели резонатора.

Тангенс угла диэлектрических потерь материала подложки $\tan \delta$ является критическим параметром для поглощения падающего излучения. Высокая величина $\tan \delta$ подложки приводит к рассеянию и поглощению энергии в самом диэлектрике. Если назначением создаваемой метаповерхности является широкополосный поглотитель излучения (абсорбер), то подложка с более высокими потерями может обеспечить более широкую полосу поглощения и более высокое пиковое поглощение [9].

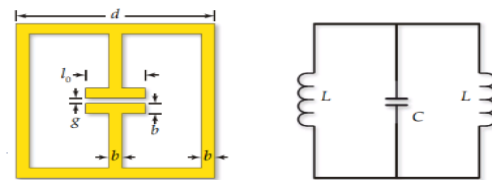


Рисунок 5 – Эквивалентная схема ELC-резонатора метаповерхности

Планарная структура сенсоров на основе резонансных метаматериальных структур, таких как резонатор с разделенным кольцом (SRR) и комплементарный резонатор с разделенным кольцом (CSRR) позволяет использовать их для исследования электрической диэлектрической проницаемости как диэлектриков, так и жидкостей, используя

методы свободного пространства, методы линий передачи и методы резонансных полостей [10].

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность применения метаповерхностей для создания чувствительных датчиков терагерцового и СВЧ диапазона и возможность создания как широкополосных, так и резонансных поглотителей излучения.

Литература

1. Yu, N. Metasurfaces for Terahertz Wavefront Manipulation and Sensing / N. Yu, F. Capasso // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – Vol. 4. – P. 1–14.
2. Linic, S. Optical Metasurfaces for Energy Conversion / S. Linic [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2021. – Vol. 16. – P. 1040–1049.
3. Schuller, J. Thermoelectric Metasurfaces for Infrared Detection / J. Schuller [et al.] // *Advanced Materials*. – 2020. – Vol. 32. – Art. 2002356.
4. Zhang, W. Terahertz Sensing with Metamaterials: A Review / W. Zhang [et al.] // *ACS Photonics*. – 2021. – Vol. 8. – P. 1235–1252.

5. Vakil, A. Graphene-Based Metasurfaces for Terahertz Sensing / A. Vakil, N. Engheta // *Science Advances*. – 2020. – Vol. 6. – Art. eabd6257.

6. Metamaterials. Physics and Engineering Explorations / ed. by N. Engheta, R.W. Ziolkowski. – IEEE Press; John Wiley & Sons, 2006. – 438 p.

7. Грищенко, С. Чувствительность резонансных характеристик частотно-избирательной поверхности на основе SRR-элементов / С. Грищенко, Н. Кисель, В. Черемисов // *Компоненты и технологии*. – 2014. – № 8. – С. 146–148.

8. Стаценко, Л. Г. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи / Л. Г. Стаценко, М. М. Смирнова, Д. С. Север, Я. С. Дронин // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – № 1. – С. 12–24.

9. Pushkar, P. A design rule for an ELC resonator / P. Pushkar, V. R. Gupta // 2015 International Conference ICPECS. – 2015. – P. 1–4.

10. Шафи, К. Т. М. Улучшенный планарный резонансный радиочастотный датчик для определения диэлектрической и магнитной проницаемости материалов / К. Т. М. Шафи, А. К. Джа, М. Д. ж. Ахтар // *IEEE Sensors Journal*. – 2017. – Т. 17. – С. 5479–5486.

УДК 681.2.084

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЫМОВОЙ КАМЕРЕ ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ

Третьяк И. Б., Прыжко А. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе приведено описание стенда для исследования взаимного влияния основных элементов конструкции дымовой камеры пожарного извещателя на распространение света в аэрозольной среде при возникновении начальной стадии пожара

Ключевые слова: пожарный извещатель, дымовая камера, стенд для исследования.

A STAND FOR RESEARCHING THE PROPAGATION OF LIGHT RADIATION IN THE SMOKE CHAMBER OF A FIRE DETECTOR

Tratsiak I. B., Pryazhko A. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper describes a setup for studying the mutual influence of the main design elements of a smoke chamber of a fire alarm on the propagation of light in an aerosol environment during the initial stage of a fire.

Keywords: fire alarm, smoke chamber, research stand.

Адрес для переписки: Третьяк И. Б., ул. Якуба Коласа, 22, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Наиболее распространенными устройствами, предназначенными для оперативного обнаружения пожара в помещениях, являются пожарные извещатели. При этом лидирующие позиции в применении занимает дымовой пожарный извещатель, работа которого основана на рассеянии светового излучения частицами дыма внутри дымовой камеры.

При дальнейшей совершенствовании конструкции таких извещателей возникает несколько направлений:

- минимизация ложных срабатываний;
- снижение затрат на его изготовление;
- оптимизация габаритных размеров и внешнего вида, так как такое изделие устанавливается также и в жилых помещениях.

С целью решения поставленных задач было проведено трехмерное компьютерное моделирование

дымовой камеры пожарного извещателя [1] и разработан способ визуализации и управления излучаемым и принимаемым световыми потоками [2]. При этом определялось влияние взаимного расположения источника и приемника излучения внутри дымовой камеры на распространение света и моделировалась погрешность изготовления элементов камеры.

Для подтверждения полученных результатов и проведения дальнейших исследований возникла необходимость разработки опытного стенда на базе существующих пожарных извещателей.

При этом разрабатываемый стенд должен удовлетворять следующим требованиям: имитировать работу существующих извещателей, иметь возможность автономного перемещения источника и приемника излучения, входных и выходных диафрагм и заслонок, а также обеспечивать возможность ввода внутрь камеры дополнительных элементов.

За основу разработки принята дымовая камера оптического интерактивного пожарного извещателя модели ИП 212-02К «ДОКА – с» [3]. При этом все элементы дымовой камеры выполнены отдельными объектами.

Источник и приемник излучения расположены в отдельных корпусах, при этом конструкцией обеспечена возможность установки соответствующих диафрагм в пределах некоторого диапазона.

Для возможности изменения расположения корпусов источника, приемника и остальных элементов камеры в их основании установлена металлизированная пластина, а под основанием камеры расположен постоянный магнит.

Для проведения замеров положения элементов камеры на дно основания нанесена координатная сетка, а также имеется возможность применения оптических методов измерения.

Для регулировки расположения элементов на основании может быть применено пружинно-винтовое или дифференциально-винтовое устройство.

Электрическая составляющая стенда базируется на источнике оптического излучения – ИК-светодиоде, и приемнике излучения – фотодиоде. Принимаемое излучение преобразуется фотоприемником в электрический ток, фиксируемый амперметром. Для повышения чувствительности

стенда применяется усилительный каскад на биполярных транзисторах.

С помощью представленного стенда планируется проведение исследований как в отсутствие аэрозольной среды, так и при наличии аэрозолей различных типов, в том числе с применением установки, моделирующей пожар в начальной стадии развития [4].

Литература

1. Третьяк, И. Б. Применение средств трехмерного моделирования при конструировании оптических элементов приборов систем безопасности / И. Б. Третьяк, Г. И. Олефир // Наука – образованию, производству, экономике: материалы, Минск, 2013 г.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2013. – Т. 2. – С. 192.
2. Третьяк, И. Б. Параметрическое моделирование пространственной области пространства сложной формы / И. Б. Третьяк, А. А. Антошин // Новые направления развития приборостроения: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. – Мн.: БНТУ, 2024. – С. 62.
3. ТУ ВУ 100016872.098-2016. Извещатель пожарный дымовой оптический интерактивный ИП 212-02К «ДОКА – с». Технические условия: введ. 01.01.2016. – Мн.: Госстандарт, 2016. – 24 с.
4. Зуйков, И. Е. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития / И. Е. Зуйков, А. А. Антошин, Г. И. Олефир, И. Б. Третьяк // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. – Мн. – 2011. – С. 125–130.

УДК 628.8.047.36:620.9

СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА

Филатов С. А.^{1,2}, Долгих М. Н.², Гайкевич Д. Н.¹, Люцко К. С.¹, Филатова О. С.², Гавриленко Н. А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются требования к системам адаптивного контроля микроклимата помещений и зданий с микропроцессорными датчиками, реализованные с использованием элементов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: системы терморегуляции, адаптивное регулирование, микроклимат.

ADAPTIVE TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS

Filatov S. A.^{1,2}, Dolgikh M. N.², Gaikevich D. N.¹, Lyutsko K. S.¹, Filatova O. S.², Gavrilenko N. A.²

¹Belarusian National Technical University

²GSO "Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus"
Minsk, Belarus

Abstract. This the requirements for adaptive microclimate control systems for rooms and buildings with microprocessor-based sensors, implemented using artificial intelligence elements are examines.

Keywords: temperature control systems, adaptive control, microclimate.

Адрес для переписки: Филатов С. А., Минск, ул. П.Бровки, 15, Республика Беларусь
e-mail: fil@hmti.ac.by

Целью применения адаптивных алгоритмов ИИ в системах терморегуляции зданий является поддержание комфортной температуры и влажности чистого воздуха с минимальным энергопотреблением и учетом ограничений оборудования. Адаптивность системы определяется способностью выбранной модели регулирования параметров подстраиваться под изменяющиеся условия (погода, занятость помещений, режимы эксплуатации, сезонность). Эффективность применения алгоритмов искусствен-

ного интеллекта (ИИ) для энергоэффективного регулирования микроклимата помещений зависит от таких факторов, как качество и количество данных, используемых для обучения ИИ-моделей. Чем больше и точнее данные о температуре, влажности, потреблении энергии и внешних условиях, тем лучше модель сможет предсказывать и оптимизировать параметры микроклимата. Решающую роль играет правильный подбор алгоритма под конкретные условия и решаемые задачи: более сложные модели

ИИ могут точнее учитывать взаимосвязи, но требуют больше вычислительных ресурсов и времени для обучения. Учет внешних факторов, таких как погода, и интеграция с системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) необходим для достижения оптимальной энергоэффективности. При этом реализация системы предполагает обязательную интеграцию данных датчиков температуры, влажности, освещенности, CO₂, энергопотребления, данных календаря и расписаний, внешнюю метеорологическую информацию.

Ключевые особенности реализации адаптивных алгоритмов управления микроклиматом с использованием ИИ для терморегуляции помещений включают создание системы регулирования с оптимальной микропроцессорной архитектурой и оптимальные алгоритмы управления.

Архитектура системы может предусматривать централизованный сбор данных с датчиков и устройств вентиляции/обогрева, микропроцессорную фильтрацию шума и обработки пропусков. При этом модель ИИ/адаптивного управления включает прогнозную часть (предсказание внешней температуры, спроса на тепло/охлаждение) и управляющая часть для изменения режимов работы кондиционеров, вентиляторов, рекуператоров (HVAC-компонентов) [1–3].

Реализация системы управления распределенной адаптивной системы управления микроклиматом возможна на одноплатных серверах (SBC, Single-Board Computers) таких как Raspberry Pi 4/5, или модулях NVIDIA Jetson серии (TX2, Xavier, Nano, Orin) со встроенной возможностью поддержки нейросетей. Распространенные микропроцессоры STM32 с FPU/DSP-расширениями обеспечивают локальную предобработку сигналов, контроль вентиляторов, кондиционеров, подключение цифровых датчиков и низкое энергопотребление.

Перспективным решением являются микроконтроллеры с нейросетевыми ускорителями на базе ESP32 с добавочным NPU-модулем/TinyML и STM32H7/H57 с встроенным нейросетевым ускорителем, а для эффективной терморегуляции средних и крупных зданий может быть использован контроллер NVIDIA Jetson Xavier/Orin в роли основного edge-сервера и минималистичные решения на STM32H7+NPU/ESP32+Edge TPU с локальной обработкой простых правил и контроля. Адаптивные алгоритмы управления включают модель на основе обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) и моделирование на основе предиктивной оптимизации (Model Predictive Control, MPC) с обучаемой стоимостью/моделью процесса.

Стандартными элементами алгоритма работы системы являются:

– сбор данных: температура, влажность, CO₂, внешний климат, наличие людей в контролируемой зоне;

– прогноз: предсказание внешней температуры на ближайшие 6–24 часа и внутренний спрос на охлаждение/обогрев;

– оптимизация: планирование управляющих сигналов на следующий интервал времени с учетом ограничений по комфорту и энергопотреблению;

– исполнение: отправка команд в систему терморегуляции и мониторинг выполнения;

– обновление: периодическое обновление модели с учетом новых данных, включая онлайн-обучение на безопасной выборке.

В разрабатываемой системе адаптивной терморегуляции для повышения энергоэффективности систем терморегуляции и климат-контроля помещений предполагается, что оптимальный ИИ алгоритм управления может быть представлен как «обучение» неизвестной функции $Y = f(X)$, которая наилучшим образом отображает входные переменные X в выходные переменные Y . Для построения ИИ алгоритмов анализа данных с целью поиска в них закономерностей и связей предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС).

Разработка системы адаптивной системы терморегулирования выполнена в среде Matlab R2015b с использованием пакета Matlab Neural Network Toolbox. Процесс создания нейросетевой модели (искусственной нейронной сети, ИНС) включает создание системы регистрации параметров воздуха в помещении и параметров внешней атмосферы, нормализацию данных и создание ИНС, как двухслойной однонаправленной сети. Обучение ИНС проводится по модифицированному алгоритму обратного распространения ошибки с ограничением по максимальному количеству эпох.

Параметры выбираются экспериментально на основе тестирования модели ИНС на независимой выборке данных. Использование Neural Network Toolbox в Matlab предоставляет основу для создания и использования различных типов нейронных сетей, включая сверточные нейронные сети (CNN) и трансформеры. Для интеграции в реальную систему управления тепловыми режимами помещения используется среда Simulink® для создания тепловой модели помещения с учетом характеристик внешней среды, тепловые характеристики помещения и системы терморегуляции (рисунок 1).



Рисунок 1 – Типовая модель системы регулирования микроклимата в среде Simulink®

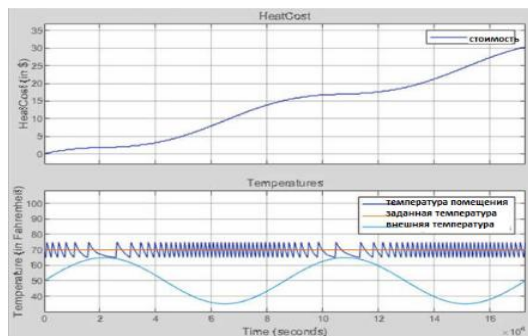


Рисунок 2 – Результат моделирования работы HVAC в среде Simulink® при циклическом изменении внешней температуры



Рисунок 3 – Пример тепловых потерь в здании с системой терморегуляции помещений

Важной составляющей системы расчетов является калькулятор стоимости, который отображает стоимость применения системы терморегуляции, рисунок 2

Анализ проведенных исследований позволяет утверждать, что наиболее эффективным инструментом для исследования особенностей алгоритмов ИИ для терморегуляции и управления микроклиматом помещений является MATLAB Deep Learning Toolbox. Этот пакет позволяет проекти-

ровать и моделировать нейронные сети, оптимизировать энергопотребление и обеспечить комфортные условия с учетом информации о температуре и влажности в помещениях, состоянии систем отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC), данные о внешней температуре и других метеофакторах, рисунок 3.

При промышленной реализации системы адаптивного управления микроклиматом необходимо учитывать привязку к помещениям (пользователям), разные предпочтения в разных зонах здания, требования безопасности и конфиденциальности. Обязательным условием является интерпретируемость решений, логирование принятых действий, обнаружение несоответствий между прогнозами и фактическими данными, самокоррекция, уведомления об отказах, учет тарифной сетки энергообеспечивающей компании.

Основными критериями оценки эффективности системы является снижение общего энергопотребления и экономия по сравнению с традиционными системами регулирования и достигнутый тепловой комфорт (средняя и дисперсия отклонения от заданной температуры/влажности), скорость реакции: время достижения целевого состояния после изменения условий работы.

Литература

1. Алоян, Р. М. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения / Р. М. Алоян, С. В. Федосов. – Иваново: ПресСто, 2016. – 276 с.
2. Wong, J. K. Intelligent building research: a review / J. K. W. Wong, H. Li, S. W. Wang // Autom. Constr. – 2005. – Vol. 14. – P. 143–159.
3. Shukla, A. Sustainability through Energy-Efficient Buildings / A. Shukla, A. Sharma. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 315 с.

УДК 621 384 3

СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПОТОКА

Филатов С. А.^{1,2}, Долгих М. Н.², Люцко К. С.¹, Филатова О. С.², Гавриленко Н. А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются перспективные MEMS системы терморегуляции и охлаждения микроэлектронной техники с пьезоэлектрическими генераторами потока охлаждающей среды.

Ключевые слова: пьезоэлектрические вентиляторы, пьезоэлектрические mems насосы, системы терморегуляции и охлаждения РЭА.

THERMAL CONTROL SYSTEMS WITH PIEZOELECTRIC FLOW GENERATORS

Filatov S.A.^{1,2}, Dolgikh M.N.², Lyutsko K.S.¹, Filatova O.S.², Gavrilenko N.A.²

¹Belarusian National Technical University

²GSO "Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus"
Minsk, Belarus

Abstract. Promising thermal control and cooling MEMS systems for microelectronic equipment with cooling medium flow piezoelectric generators are considered.

Keywords: piezoelectric fans, piezoelectric mems pumps, temperature control and cooling systems for electronic equipment.

Адрес для переписки: Филатов С. А., Минск, ул. П. Бровки, 15, Республика Беларусь

e-mail: fil@hmti.ac.by

Системы терморегуляции могут быть улучшены с помощью теплообменников спьезоэлектрическими генераторами потока, в которые интегрированы пьезоэлектрические вентиляторы [1–5] или динамические пьезотермоэлектрические генераторы (dPTEG) для управления теплопередачей. Пьезоэлектрические вентиляторы, изготовленные из тонких гибких вибрирующих лопастей, эффективно улучшают конвективный теплообмен в системах с низким расходом воздуха, создавая сфокусированные винтовые потоки воздуха, рисунок 1, 2.

В некоторых случаях система может быть спроектирована как с пьезоэлектрическими элементами, так и с термоэлектрическими генераторами, использующими механическую энергию потока жидкости для выработки электроэнергии и одновременно повышающими эффективность теплообменника в системе терморегуляции.

Наибольшее практическое распространение получили пьезоэлектрические вентиляторы компании General Electric (GE) реализующие технологию Dual Piezoelectric Cooling Jets (DCJ), рисунок 3.



Рисунок 1 – Устойчивый к загрязнениям пьезоэлектрический вентилятор (10мВт, до 1000С, 86–118Гц)) (Chengdu Huitong West-Electronic Co., Ltd)

В традиционных DCJ вентиляторах используется технология т. н. двойных пьезоэлектрических охлаждающих струй, создающая турбулентный поток воздуха, который позволяет увеличить теплопередачу за счет естественной конвекции до 3 раз. Устройство «всасывает» окружающий горячий воздух, а потом выбрасывает его отправляет его с высокой скоростью, рисунок 3. DCJ вентиляторы имеют высоту менее 2,5 мм и потребляют меньше энергии, чем традиционные решения с принудительной конвекцией, обеспечивая при этом сопоставимый воздушный поток, что подтверждают данные компьютерного моделирования, рисунок 4.

Еще большей эффективностью обладают пьезоэлектрические системы, реализованные в MEMS устройствах охлаждения микросистем. Пьезоэлектрический насос использует вибрирующие пьезоэлектрические пленки для создания воздушного или жидкостного потока, непосредственно охлаждая электронные устройства без традиционных вентиляторов этот «твердотельный» подход, реализованный с использованием технологий микропроизводства, таких как фотолитография, позволяет создавать миниатюрные, энергоэффективные и надежные

решения для охлаждения. Высокая локальная эффективность в микромасштабе позволяет охлаждать конкретные горячие зоны микросхем, минимизируя тепловые сопротивления и падения температуры по всей системе [6–10].

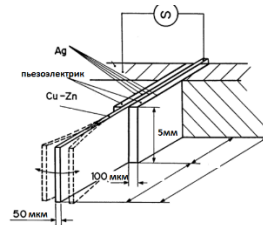


Рисунок 2 – Базовая конструкция пьезоэлектрического вентилятора

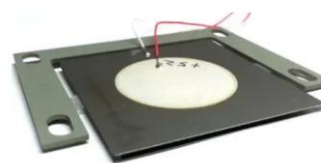


Рисунок 3 – Общий вид пьезоэлектрического вентилятора DCJ производства компании Aavid Thermalloy (<https://www.directindustry.com/prod/aavid-thermalloy/product-157466-1712856.html>)

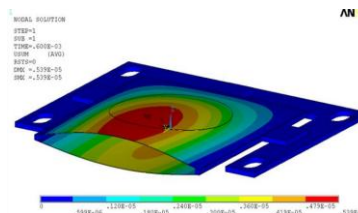


Рисунок 4 – Компьютерная модель [5] DCJ вентилятора теплообменного устройства

При этом обеспечивается компактность и совместимость с CMOS-процессами: структура может быть интегрирована на стандартных подложках, что облегчает массовое производство и уменьшает стоимость, так как наиболее распространенный и эффективные пьезоэлектрики AlN и PZT ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$), хорошо подходит для микромеханических (MEMS) приводов, в которых иногда применяют многослойные структуры, где внешний слой из PZT обеспечивает высокий деформирующий эффект, а внутренние слои из AlN или другой матрицы – обеспечивают стабильность и совместимость.



Рисунок 5 – Типичная конструкция пьезоэлектрического MEMS насоса [7] и пример интеграции пьезонасоса в платую компании Microjet Technology

Наиболее перспективным решением в реализации MEMS охлаждения являются пьезоэлектрические насосы в микроканалах которые создают принудительную конвекцию в миниатюрных каналах для увеличения теплообмена, рисунок 6.

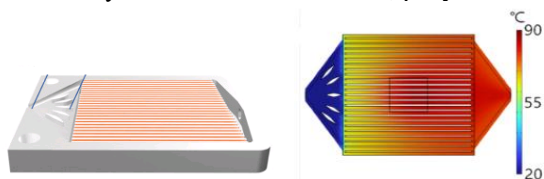


Рисунок 6 – Пример топологии микроканалов с пьезоэлектрическим насосом и тепловая модель охлаждаемой области [11]

В этом случае наиболее интересны пьезоэлектрики с высокой теплопроводностью, так как характерные размеры микроканалов для конвекции: ширина 10–200 мкм, высота 20–200 мкм при размерах пьезопривода (насоса): длина и ширина 10–200 мкм, толщина 1–20 мкм при толщине пьезослоя 0.5–5 мкм в зависимости от интенсивности деформации и требуемого усилия.

Перспективность применения микроканальных МЭМС систем с пьезоэлектрическими насосами и вентиляторами для охлаждения микроэлектронных устройств заключается в их компактности, высокой эффективности охлаждения. Они позволяют эффективно отводить тепло от небольших, но мощных микроэлектронных компонентов, таких как процессоры и микросхемы памяти. Пьезоэлектрические насосы и вентиляторы обеспечивают точное управление потоком охлаждающей жидкости или воздуха, что способствует оптимальному тепловому режиму работы устройств. Использование МЭМС технологий позволяет создавать интегрированные решения для охлаждения, уменьшая общие габариты системы.

УДК 621 384 3

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ, ВОЗДУШНЫХ И ПОЧВЕННЫХ СРЕД

Филатов С. А.^{1,2}, Долгих М. Н.², Гайкевич Д. Н.¹, Люцко К. С.¹, Филатова О. С.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются особенности реализации микропроцессорной система мониторинга водных, воздушных и почвенных сред с использованием геоинформационной системы QGIS.

Ключевые слова: сенсоры, геоинформационные системы, мониторинг.

A DISTRIBUTED MICROPROCESSOR-BASED SENSORS SYSTEM FOR MONITORING WATER, AIR, AND SOIL ENVIRONMENTS

Filatov S. A.^{1,2}, Dolgikh M. N.², Gaikevich D. N.¹, Lyutsko K. S.¹, Filatova O. S.²

¹Belarusian National Technical University

²GNU "Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus "

Minsk, Belarus

Abstract. The implementation features of a microprocessor-based sensors system for monitoring water, air, and soil environments using the QGIS geographic information system. are considered.

Keywords: sensors, geoinformation systems, monitoring.

Литература

1. Asadi Dereshgi, H. Analytical analysis of a circular unimorph piezoelectric actuator in the range of low voltages and pressures / H. Asadi Dereshgi, H. Dal, M. E. Sayan // *Microsystem Technologies*. – 2020. – Vol. 26, № 8. – P. 2453–2464.
2. Hales, A. A review of piezoelectric fans for low energy cooling of power electronics / A. Hales, X. Jiang // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 215. – P. 321–337.
3. Maaspuro, M. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs—A review / M. Maaspuro // *Microelectronics Reliability*. – 2016. – Vol. 63. – P. 342–353.
4. Characterization and optimization of the thermal performance of miniature piezoelectric fans / T. Acikalin [et al.] // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2007. – Vol. 28, № 4. – P. 806–815.
5. Optimum tip gap and orientation of multi-piezofan for heat transfer enhancement of finned heat sink in microelectronic cooling / M. K. Abdullah [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – № 25–26. – P. 7513–7520.
6. Heat transfer enhancement in microchannels with cross-flow synthetic jets / T. T. Chandratilleke [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2010. – Vol. 49, № 12. – P. 2307–2317.
7. Piezoelectric micropump cooler for high-power electronic cooling / W. Tong [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 233. – Art. 126062.
8. A High-Performance Synthetic Jet Piezoelectric Air Pump with Petal-Shaped Channel / X. Li [et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 9. – Art. 3227.
9. Analytical and experimental study of a valveless piezoelectric micropump with high flowrate and pressure load / J. Ni [et al.] // *Microsystems & Nanoengineering*. – 2023. – Vol. 9. – Art. 72.
10. Piezoelectric Active Air-Cooling Devices / B. Peng [et al.] // *Chip*. – 2025. – Art. 100163.
11. Piezoelectric micropump cooler for high-power electronic cooling / W. Tong [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 233. – Art. 126062.

Адрес для переписки: Филатов С. А., Минск, ул. П.Бровки, 15, Республика Беларусь
e-mail: fil@hmti.ac.by

Мониторинг параметров почвы, растительности, воздуха и воды с помощью микропроцессорных датчиков и геоинформационных систем (ГИС) является необходимым процессом в точном земледелии для принятия обоснованных решений, поскольку он предоставляет точные данные в реальном времени, позволяя оптимизировать использование ресурсов, повысить урожайность и качество продукции, а также минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Микропроцессорные датчики с цифровым интерфейсом позволяют получить достоверную информацию о влажности почвы, температуре, уровне питательных веществ и других показателях, что позволяет точно регулировать полив, внесение удобрений и других агрохимикатов, избегая перерасхода и снижая затраты. Постоянное наблюдение за состоянием полей и растений позволяет своевременно выявлять проблемы и принимать меры, способствующие максимальному росту и лучшему качеству урожая [1, 2].

Сбор данных о состоянии воздуха и воды, а также анализ состояния почв помогают предотвратить загрязнение, эрозию и другие негативные процессы, связанные с антропогенным воздействием.

Применение ГИС обеспечивает интеграцию данные от множества распределенных датчиков и позволяют создавать наглядные карты полей, показывающие неоднородность условий. Это дает возможность применять различные агрономические операции дифференцированно, с учетом специфики каждого участка. Собранные данные используются для создания моделей развития растений и погодных условий, что помогает прогнозировать урожайность и планировать дальнейшие действия. Разработанная геоинформационная система предназначена для мониторинга экспериментально определяемых экологических параметров водных, воздушных и почвенных сред. Особенностью системы является отображение данных дистанционного зондирования Земли (влажности, индекса вегетации, температуры и др. параметров) с использованием сервисов ГИС QGIS, модулей «QuickMapServices», «Georeferencer GDAL», «Spreadsheet Layers» и данных внешних таблиц «MS Excel. QGIS – свободно распространяемая международная ГИС для создания, редактирования, визуализации, анализа и формирования отчетов по геопространственной информации. QGIS поддерживает большинство распространенных векторных и растровых форматов, баз данных, а также имеет развитый набор встроенных инструментов для организации эффективной работы с данными. QGIS позволяет создавать, редактировать векторные данные, экспортировать с пространственной привязкой к местности.



Рисунок 1 – Рабочее окно ГИС QGIS с отображением данных наземных наблюдений температуры и влажности почвы

Мониторинг индексов вегетации контролируемых земельных участков, в том числе ретроспективный мониторинг, осуществляется с помощью сервисов спутниковых данных Sentinel-2 для создания цифровых карт индексов вегетации NDVI, OSAVI и других, рисунок 2.

Результаты спутниковых данных дополнялись с помощью микропроцессорных датчиков (носимых, мобильных и стационарных), разработанных для измерения распределения температуры и влажности почвы до глубины 1 метр, солености (проводимости) почвы, наличия влаги с помощью почвенных тензиометров и качества воздуха (концентрации CO₂, NO, аэрозолей и т. д.) и текущих координат датчика, рисунок 3.

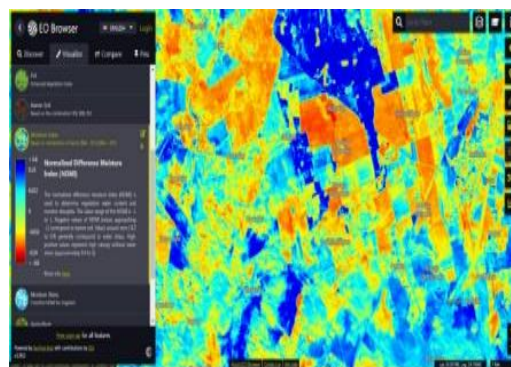


Рисунок 2 – Рабочее окно программы EOBrowser с выбранной областью анализа (индекс влажности почвы)



Рисунок 3 – Микропроцессорные датчики температуры, влажности почвы, качества воздуха и воды (ESP32 с модулями DHT22 (температура/влажность), датчики газа (MQ-135))

Особенностью разработанных систем является отображение на экране носимых микропроцессорных устройств номера датчика, значений температуры на различной глубине, влажности

и температуры воздуха. Микропроцессорные датчики собирают данные в режиме реального времени, в то время как геоинформационные системы (ГИС) анализируют и визуализируют эти данные, предоставляя информацию о состоянии полей, потребностях растений в воде и питательных веществах, а также о других факторах, влияющих на урожайность, таких как содержание азота, фосфора, калия в почве. Микропроцессорный датчик для инверсионного кулонометрического анализа для определения концентрации NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , NH_4^+ , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в воде, рисунок 4, является упрощенным вариантом электрохимического анализатора с сенсорами на основе толстополеночных графитовых электродов. Инверсионный метод предполагает предварительное концентрирование анализируемых компонентов, что повышает чувствительность анализа [3, 4].



Рисунок 4 – Микропроцессорный электрохимический анализатор качества воды

При определении макро- и микроэлементов в почвенной воде на первом этапе осуществляется накопление (электролиз) ионов металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , NH_4^+) на поверхности рабочего углеродного электрода под действием приложенного потенциала. После накопления потенциал электрода меняется на противоположный, что приводит к окислению

(для металлов) или восстановлению (для анионов) осажденных веществ. Ток, возникающий при этом процессе, пропорционален концентрации анализируемого вещества. Пики тока соответствуют конкретным веществам, а их высота или площадь под кривой – концентрации, что позволяет проводить быстрый и точный анализ качества воды, определяя наличие и концентрацию различных загрязнителей.

Прогнозирование и адаптивное управление агротехническими мероприятиями на основе данных с микропроцессорных датчиков (влажности, температуры, качества воздуха) предполагается реализовать, используя облачные сервисы или локальные базы данных для хранения и обработки информации. Анализ результатов систематических наблюдений позволяет выявить корреляции между параметрами и применить статистические методы для прогнозирования урожайности и потребности в поливе на основе данных о влажности почвы и прогноза погоды.

Литература

1. Review on IoT based smart agriculture monitoring system / G. Priyadharshini [et al.] // Int. Journal of Research and Analytical Reviews. – 2024. – Vol. 9. – P. 38–43.
2. A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies / V. Kumar [et al.] // Smart Agricultural Technology. – 2024. – Vol. 8. – Art. 100487.
3. Брайнина, Х. З. Инверсионные электроаналитические методы / Х. З. Брайнина, Е. Я. Нейман, В. В. Слепушкин. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
4. Брайнина, Х. З. Сенсоры и приборы для проточного, лабораторного и полевого инверсионно-вольтамперометрического анализа / Х. З. Брайнина [и др.] // Снежинск и наука: докл. конф. / Снежинский физико-технический институт. – Снежинск, 2000. – С. 45–52.

УДК 681.518.5

АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СЕНСОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРЕКТНОСТИ ИХ РАБОТЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ Хейфец М. Л., Рябцев В. Н., Винтов Д. А., Савеня П. С.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается применение методов цифровой обработки сигналов для контроля корректности функционирования акселерометров, используемых в системах автоматизированного мониторинга. Приведены критерии диагностики деградации сенсоров и результаты экспериментальных исследований.
Ключевые слова: системы автоматизированной диагностики повреждений, корректность работы сенсоров, частотно-временной анализ, вейвлет-анализ.

ANALYSIS OF SENSOR SIGNALS FREQUENCY-TIME PARAMETERS TO CHECK THEIR CORRECTNESS IN THE AUTOMATED SYSTEM KhEIFETZ M. L., RYABTSEV V. N., VINTOV D. A., SAVENYA P. A.

State scientific institution “Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus”, Minsk, Belarus

Abstract. The application of digital signal processing methods to check the correctness of function of accelerometers used in automated monitoring systems is considered. The criteria diagnosis of degradation of sensors and results of experimental studies are given.

Keywords: automated damage diagnosis system, correct operation of sensors, frequency-time analysis, wavelet analysis.

Адрес для переписки: Рябцев В. Н., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ryabtsev@iaph.bas-net.by

По мере усложнения конструкций различного назначения вопросы обеспечения их надежности и безопасности приобретают первостепенное значение. Ключевым фактором в решении этой задачи является постоянный контроль технического состояния конструкций и своевременная диагностика эксплуатационных повреждений.

С целью повышения оперативности выявления потенциальных повреждений сложных конструкций, они снабжаются системами автоматизированного мониторинга технического состояния. Такие системы позволяют отслеживать изменения нормируемых параметров в местах установки соответствующих сенсоров в режиме реального времени.

Автоматизированный мониторинг открывает возможность сравнения текущих данных с более ранними и прогнозировать скорость деградации элементов конструкции и ее остаточный ресурс. Кроме того, стремительное развитие систем искусственного интеллекта открывают возможность использования систем автоматизированного мониторинга для диагностики эксплуатационных повреждений элементов конструкций и мест их расположения [1].

Дальнейшее развитие инженерных систем с интегрированными сенсорами получает все более широкое распространения во многих направлениях человеческой деятельности. Вместе с этим усложняются и сами процессы диагностики за счет совершенствования сенсорных систем и процессов обработки данных. Перспективным направлением является диагностика эксплуатационных повреждений системой сенсоров как единого целого, вместо диагностики отдельных параметров единичными датчиками, как это принято при неразрушающем контроле.

Однако преимущество такого подхода в виде кратного увеличения значимой для диагностики информации оборачивается кратным же увеличением ее объема и усложнением структуры данных. Кроме того, повышаются требования к исправности самих сенсоров, так как сбой даже одного из них неизбежно приводит к сбою в работе всей системы сенсоров. Из этого вытекает необходимость, как минимум периодической диагностики сенсорной системы.

Методика контроля акселерометров систем автоматизированного мониторинга с использованием отдельных статистических и частотно-временных параметров их сигналов рассматривалась ранее [2]. Помимо использования спектрограмм [2], для решения такого рода задач, можно применять более совершенные методы [3], например вейвлет-анализ [4], который дает возможность изучать нестационарные сигналы с быстро меняющимися частотными компонентами и выявлять мельчайшие детали временной структуры сигнала [5].

Эффективность метода достигается за счет использования различных масштабов, позволяющих детально изучить как низкочастотные, так и

высокочастотные составляющих сигнала. Восстановление сигнала из составляющих дискретного вейвлет-преобразования открывает возможность фильтрации шума в сигнале. Кроме того, вейвлет-анализ позволяет сравнивать сигналы, поступающие от двух различных сенсоров по их когерентности, что особенно важно при оценке согласованности их работы в составе единой диагностической системы.

На рисунке 1 приведены результаты вейвлет-анализа сигналов акселерометров эксплуатируемой системы автоматизированного мониторинга высотного здания.

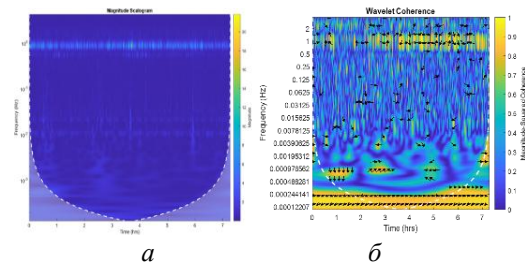


Рисунок 1 – Вейвлет-анализ сигналов акселерометра эксплуатируемой системы автоматизированного мониторинга высотного здания: *а* – типичная скейлограмма акселерометра, *б* – сравнение сигналов двух соседних акселерометров с использованием вейвлет-анализа

На типичной скейлограмме акселерометра (рисунок 1, *а*) отчетливо просматривается светлая полоса в области частоты в 1 Гц на всем временном участке наблюдения, соответствующая первым частотам собственных колебаний конструкции.

Динамика изменения вейвлет-когерентности сигналов, поступивших от двух соседних сенсоров (рисунок 1, *б*), показывает, в области частот собственных колебаний конструкции когерентность сигналов нестабильна во времени, начиная от низкой на участке от начала временного промежутка до 2,5 часов наблюдения, до достаточно высокой на последующем временном участке до конца наблюдений. Это дает основание предполагать возможность внешнего воздействия на измерительную систему в области установки одного из сенсоров либо его некорректную работу.

Векторы (стрелки) показывают относительную фазу между сигналами (фазовое смещение). Белая пунктирная линия – границы доверительного интервала (принято 95 %).

Таким образом, полученные данные показывают, что использование вейвлет-анализа служит эффективным инструментом не только для частотно-временного анализа отдельных сигналов, но и для их сравнения, что особенно важно при оценке согласованности работы сенсоров.

Литература

1. Рябцев, В. Н. Определение поврежденных элементов несущих конструкций здания с использованием нейронной сети / В. Н. Рябцев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2022. – № 3. – С. 25–30.

2. Контроль акселерометров систем автоматизированного мониторинга с использованием частотно-временных параметров сигнала / В. Н. Рябцев [и др.] // Не разрушающий контроль и диагностика. – 2025. – № 1. – С. 41–46.

3. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя, К. А. Солнцева. – Мн.: Беларус. наука, 2011. – 283 с.

4. Using wavelet analysis to study structures and properties of structural materials / M. L. Kheifetz [et al.] // Non-linear Phenomena in Complex Systems. – 2023. – Vol. 26, № 4. – P. 385–392.

5. Воробьев, В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин. – СПб.: Изд-во ВУС, 1999. – 208 с.

УДК 629.7.054.07

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП НА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Шейников А. А.¹, Суходолов Ю. В.²

¹Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Волоконно-оптические гироскопы широко применяются в авиационных бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов военного назначения. Для повышения эффективности боевого применения малых ударных беспилотных летательных аппаратов возникла необходимость существенного удешевления конструкции датчиков пилотажно-навигационных параметров полета. В процессе исследований разработан волоконно-оптический гироскоп на телекоммуникационных элементах, отличающийся существенным снижением цены (на 77 %) при небольшом снижении точности (20 %) относительно классических волоконно-оптических гироскопов. Проведено моделирование работы предлагаемого измерительного прибора.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, телекоммуникационные элементы, навигационная система беспилотного летательного аппарата.

FIBER OPTICAL GYROSCOPE ON TELECOMMUNICATION ELEMENTS

Sheinikov A. A.¹, Sukhodolov YU. V.²

¹Educational institution «Military Academy of the Republic of Belarus»

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Currently, fiber-optic gyroscopes are widely used in aviation strapdown inertial navigation systems of military aircraft. From the point of view of the effectiveness of the combat use of small attack unmanned aerial vehicles, there is currently a need to significantly reduce the cost of the design of flight navigation parameters sensors. In the process of research, a fiber-optic gyroscope based on telecommunication elements was developed, characterized by a significant reduction in price (by 77 %) with a slight decrease in accuracy (20 %) relative to classic fiber-optic gyroscopes. The operation of the proposed measuring device was simulated.

Keywords: fiber optic gyroscope, telecommunication elements, navigation system of unmanned aerial vehicle.

Адрес для переписки: Шейников А. А., пр. Независимости, 220, г. Минск 220057, Республика Беларусь
e-mail: af.varb.ao@gmail.com

Передовые волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) имеют характеристики, соответствующие требованиям к точности навигации (около 0,05 °/ч) для пилотируемых воздушных судов и тяжелых беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Причем применение ВОГ (средняя масса ВОГ составляет около 0,7 кг) позволяет повысить показатель точность/масса для бортового навигационного оборудования (НО) по сравнению с лазерными гироскопами. Следует также учитывать, что в отличие от последних в ВОГ в качестве излучателей могут использоваться светодиоды, что существенно уменьшает стоимость прибора (цена ВОГ с лазерным излучателем составляет от 15 000 \$, цена ВОГ с суперлюминесцентным диодным излучателем составляет около 7000 \$). Кроме того, появляется воз-

можность полного отказа от использования сигналов спутниковой коррекции, что актуально для военных БЛА. Так, средний БЛА (до 500 кг), оснащенный ВОГ с удовлетворительными характеристиками (скорость дрейфа 0,1 °/ч), при скорости 130 км/ч в полете с максимальной продолжительностью (5 ч, 650 км) на скорости 130 км/ч отклонится от заданного маршрута на 3 км. Наибольшей точности ВОГ (0,001 °/ч) добились американские фирмы Northrop Grumman и Honeywell (при такой точности ВОГ, отклонение БЛА, с учетом рассмотренных выше начальных условий, составит около 32 м). При этом, ведущее российское предприятие «Физоптика» освоило производство ВОГ класса точности менее 1 °/ч [1] (стоимость ВОГ с точностью 0,8 °/ч составляет 1000 \$). Анализ текущих военных кон-

фликтов показывает все возрастающее значение малых БЛА (МБЛА) (масса до 10 кг) на поле боя, особенно в тактической глубине до 30 км. В настоящее время речь идет о массовом применении МБЛА в составе роя. В таких условиях на первое место выходит цена БЛА и, соответственно, цена его бортового оборудования. Снижение цены ВОГ, при этом, возможно за счет некоторого снижения его точности с учетом относительно небольшого тактического радиуса действия МБЛА. Авторами предлагается конструкция простого ВОГ, собранного на основе стандартных телекоммуникационных элементов (ТЭ): медиаконвертора (МК), оптических разветвителей (ОР), оптоволоконных кабелей (ОВК) и витой пары. В качестве генератора и измерителя электрических импульсов предлагается широко распространенная отладочная плата Arduino Uno. Работа ВОГ на ТЭ организована следующим образом (рисунок 1).

Arduino через МК формирует оптический сигнал, который далее поступает на ОР. Разветвитель делит исходный сигнал на два встречных пучка, которые направляются в длинные катушки ОВК. Световые волны проходят по встречным путям и затем поступают на оптический смеситель, где складываются. На выходе формируется результирующий сигнал, который преобразуется МК обратно в электрический и подается на Arduino. В Arduino полученный сигнал интерпретируется в значение угловой скорости вращения. Главная особенность представленного ВОГ заключается в том, что он собран из доступных ТЭ, массово представленных на рынке. Благодаря такому подходу удалось реализовать модель ВОГ без специализированных фотодетекторов и лазерных источников, что делает конструкцию ВОГ относительно дешевой (230 \$). Также следует отметить простоту сборки и модульность конструкции. ТЭ имеют стандартизованные разъемы (RJ-45, SC), их легко соединять без юстировки. В то же время классический ВОГ требует прецизионной сварки оптоволокна и сложной настройки оптической схемы. Использование МК и Arduino позволяет сразу работать с цифровыми сигналами и легко интегрировать гироскоп в НО БЛА. При этом в классических ВОГ необходимо наличие отдельных блоков электроники для обработки сигнала. Кроме этого, в таких ВОГ конструкция фиксирована. Что касается телеком-ВОГ, то в нем можно менять длину ОВК, тип ОР, параметры источников сигналов прямо «на коленке», проверяя, как это влияет на чувствительность прибора. На рисунке 2 представлены результаты моделирования телеком-ВОГ при разной длине волны и площади витков ОВК.

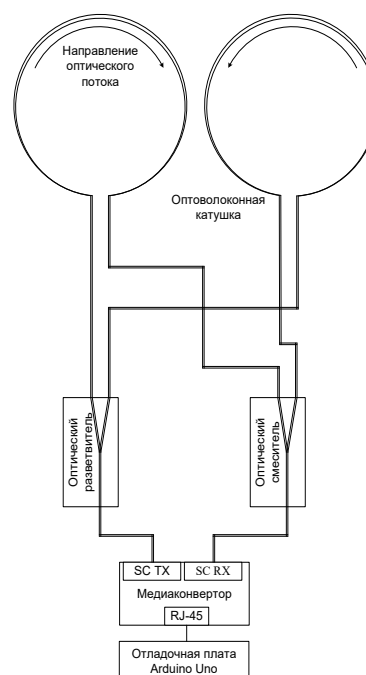


Рисунок 1 – Основные методы диагностики состояния электрических машин

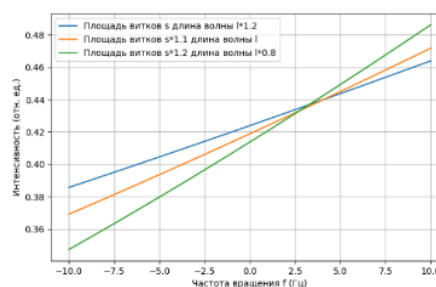


Рисунок 2 – Основные методы диагностики состояния электрических машин

Для объективности следует отметить, что точность у телеком-ВОГ (1 %/ч) ниже, чем у классического ВОГ. МК не дают когерентного излучения высокой стабильности, что снижает качество интерференции, а температура и шумы сильнее влияют на выходной сигнал. Однако, эти недостатки с лихвой перекрываются низкой ценой и технологичностью прибора.

Литература

- Олехнович, Р. О. Пути создания волоконно-оптического гироскопа повышенной точности: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01 / Р. О. Олехнович. – СПб., 2010. – 115 с.
- Сущенко, О. А. Обзор современного состояния волоконно-оптических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О. А. Сущенко, В. В. Пальчик // Электроника и системы управления – 2011. – № 3(29). – С. 74–84.

УДК 681

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА ПОЛОГО ЦИЛИНДРА

Ризноокая Н. Н., Красневский Д. Ю., Шилько И. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются теоретические принципы измерения поверхностного натяжения. Предлагается метод отрыва тонкостенного цилиндра с измерением высоты отрыва. Приводятся формулы для расчета коэффициента поверхностного натяжения.

Ключевые слова: поверхностное натяжения, полый цилиндр, метод отрыва.

MEASURING SURFACE TENSION BY THE HOLLOW CYLINDER TEAR-OFF METHOD

Riznookaya N. N., Krasnevsky D. Yu., Shilko I. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper examines the theoretical principles of measuring surface tension. A thin-walled cylinder tear-off method with measurement of the tear-off height is proposed. Formulas for calculating the surface tension coefficient are provided.

Keywords: surface tension, hollow cylinder, tear-off method.

Адрес для переписки: Ризноокая Н. Н., пр. Независимости, 52, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

В любых гетерогенных системах с достаточно развитой поверхностью раздела между фазами поверхностная или межфазная энергия является одним из основных факторов, определяющих состояние системы [1]. Измерение поверхностного и межфазного натяжения осуществляется с помощью тензиометров. Чаще всего к измерению поверхностного натяжения прибегают в химической и пищевой промышленности, для оценки качества растворов.

Существует множество методов определения поверхностного натяжения [2]. У каждого метода определения поверхностного натяжения существуют как достоинства, так и недостатки.

Метод отрыва полого цилиндра отличается высокой чувствительностью и простотой реализации. В существующем виде он сводится к измерению силы отрыва этого цилиндра от поверхности исследуемой жидкости, и его точность уступает другим методам. В первую очередь, это связано с необходимостью калибровки силы отрыва, с весом жидкости, прилипающей к кольцу после отрыва мениска, а также угла смачивания.

В данной работе предлагаются метод, позволяющие упростить реализацию и увеличить точность измерения коэффициента поверхностного натяжения путем отрыва полого цилиндра. В данном методе поверхностное натяжение определяется путем измерения максимальной высоты мениска, образуемого при отводе цилиндра от поверхности жидкости.

Теория отрыва тел конечных размеров от поверхности смачивающих жидкостей очень сложна. Наиболее просто решается задача об отрыве бесконечно длинной прямоугольной пластины. Однако бесконечно длинных пластинок не существует и при отрыве от жидкости эффекты на краях пластинки будут вносить большие искажения в картину отрыва. Поэтому в качестве узкой

пластинки, у которой отсутствуют края, удобно взять тонкостенный цилиндр. При этом надо учитывать, что, вследствие искривленности его поверхности поверхность жидкости будет уже иметь двойную кривизну (рисунок 1).

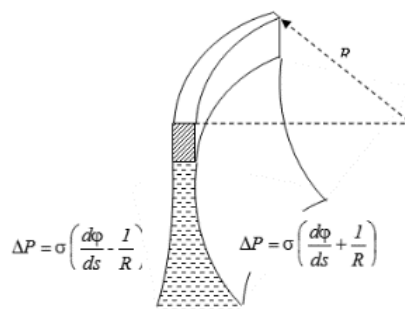


Рисунок 1 – Кривизна столба и разность давлений в жидкости, поднимаемой цилиндром

Внутренняя поверхность жидкости станет двояковогнутой, наружная поверхность – выпукловогнутой. Ее кривизна уменьшится по сравнению с аналогичной кривизной в случае пластинки, поскольку поверхность жидкости и поверхность цилиндра имеют кривизны разных знаков.

Большая кривизна внутренней поверхности столба жидкости по сравнению с кривизной наружной поверхности приведет к тому, что уровень жидкости внутри столба будет выше внешнего исходного невозмущенного уровня. В конечном счете, это приведет к увеличению веса столба жидкости, приходящегося на единицу длины цилиндра по сравнению с весом столба для тонкой пластинки.

Дополнительная кривизна поверхностей столба жидкости приводит к изменению давления в нем. При расчете этого изменения приближенно можно принять, что вдоль всей высоты столба жидкости дополнительная кривизна остается постоянной

и равной кривизне наружной поверхности цилиндра. Очевидно, что это допущение приведет к дополнительной методической погрешности при оценке высоты столба.

Формула для наружной поверхности столба жидкости запишется в виде

$$(\rho g y - \frac{\sigma}{R}) dy + \sigma \sin \varphi d\varphi = 0. \quad (1)$$

Интегрируя это выражение получим

$$h^2 = 2p^2(1 - \frac{h}{R}) + 2p^2 \cos \varphi_0. \quad (2)$$

В случае очень узкой пластинки $\varphi_0 = \pi/2 - \Delta\varphi$. Учитывая малость $\Delta\varphi$, имеем $\cos \varphi_0 = \sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi - \frac{1}{6}(\Delta\varphi)^3$. Тогда

$$h^2 \approx 2p^2 \left[1 - \frac{h}{R} + \sqrt{2} \frac{l}{p} - \frac{(2)^{3/4}}{6} \left(\frac{l}{p} \right)^{3/2} \right]. \quad (3)$$

Считая слагаемые в квадратных скобках этого выражения малыми по сравнению с единицей и извлекая квадратный корень по формуле $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$, получим

$$h \approx \sqrt{2}p \left[1 - \frac{h}{2R} + \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{l}{p} - \frac{(2)^{3/4}}{12} \left(\frac{l}{p} \right)^{3/2} \right]. \quad (4)$$

Последнее слагаемое будем рассматривать как относительную погрешность, т.е.

$$\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_{\text{мет}} = - \frac{(2)^{3/4}}{12} \left(\frac{l}{p} \right)^{3/2}. \quad (5)$$

В данном случае она связана с погрешностью математической модели (конкретно, с приближенностью вычислений). Тогда

$$h \approx \sqrt{2}p \left(1 - \frac{h}{2R} + \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{l}{p} \right). \quad (6)$$

Данная формула является частным случаем формулы, полученной для бесконечно длинной пластинки, можно увидеть, что при $R = \infty$ обе формулы совпадают между собой.

На основании полученных результатов можно предложить два метода измерения величины коэффициента поверхностного натяжения на границе жидкость – воздух. Метод измерения силы и метод измерения высоты столба жидкости. Рассмотрим метод измерения максимальной высоты столба жидкости.

Метод измерения максимальной высоты столба жидкости строится на основе формулы (6). Удобнее, однако, воспользоваться формулой (3), поскольку нам нужна не величина h , а величина p^2 , т.к. $p^2 = \frac{\sigma}{\rho g}$. Отбросив в (3) последнее слага-

емое, как погрешность, получим

$$h^2 \approx 2p^2 \left(1 - \frac{h}{R} + \sqrt{2} \frac{l}{p} \right). \quad (7)$$

При больших R и малых l в первом приближении имеем $p \approx \frac{h}{\sqrt{2}}$. Подставляя это выражение в третье слагаемое в скобках формулы (7), из нее найдем

$$\sigma = \frac{h^2}{2 \left(1 - \frac{h}{R} + \sqrt{2} \frac{l}{h} \right)}. \quad (8)$$

Из этой формулы легко получить, что погрешность оценки коэффициента σ , связанная с погрешностью оценки высоты h , имеет вид $\Delta\sigma/\sigma = \Delta h/h$. Отсюда, учитывая (5) и равенство $p \approx \frac{h}{\sqrt{2}}$, найдем методическую погрешность оценки σ рассматриваемым методом:

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right)_{\text{мет}} = - \frac{\sqrt{2}}{6} \left(\frac{l}{h} \right)^{3/2}. \quad (9)$$

Следует, однако, учитывать, что методические погрешности совсем не обязательно являются основными погрешностями измерений. Здесь важную роль играют инструментальные погрешности (погрешности измерительных приборов), а также случайные погрешности измерений.

В соответствии с предложенной теорией были проведены измерения коэффициента поверхностного натяжения. Исследуемой жидкостью являлась дистиллированная вода. Расчетное значение коэффициента поверхностного натяжения воды $\sigma = 72$ мДж/м² при температуре 21 °С, инструментальная погрешность $\Delta\sigma_{\text{инстр}} = 0,33$, $\Delta\sigma_{\text{мет}} = 0,23$. Данные результаты коррелируют с известными справочными данными [3].

Исследования показали, что метод отрыва полного цилиндра позволяет увеличить точность и не требует калибровки, а также отличается простотой и низкой стоимостью.

Литература

1. Миссол, В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах / В. Миссол; пер. с польск. – М.: Металлургия, 1978. – 176 с.
2. Мамонова, М. В. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы / М. В. Мамонова, В. В. Прудников, И. А. Прудникова. – М.: Физико-математическая литература, 2011. – 400 с.
3. Сорокопуд, А. Ф. Исследование физико-химических свойств водных и водно-спиртовых экстрактов / А. Ф. Сорокопуд, П. П. Иванов // Химия растительного сырья. – 2002. – № 2. – С. 111–116.

УДК 621.383

ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Воробей Р. И., Гусев О. К., Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Шакурская Л. И., Свистун А. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Сенсоры на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими несколько уровней с разными зарядовыми состояниями в запрещенной зоне, могут использоваться при решении многих задач оптической диагностики. Особенности

физических процессов работы таких сенсоров позволяют создавать фотоприемники с различными функциональными возможностями. Представлена новая процедура измерения, реализующая ряд особенностей свойств и преобразовательных характеристик таких сенсоров.

Ключевые слова: мультипараметрический сенсор, приборная структура, глубокая примесь, преобразовательная характеристика, процедура измерения.

MULTI-PARAMETRIC SENSORS-BASED MEASUREMENT PROCEDURE

Vorobey R. I., Gusev O. K., Tyavlovsky A. K., Tyavlovsky K. L., Shadurskaya L. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Sensors based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurities which for several levels with different charge states could be used to solve many tasks of optical diagnostics. Peculiarities of physical processes of the operation of such sensors make it possible to create photodetectors with different functionality. A new measurement procedure is proposed which utilizes several features of physical properties and characteristic curves of such sensors.

Keywords: multi- parametric sensor, device structure, deep impurity, characteristic curve, measurements.

Адрес для переписки: Тьявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Сенсоры на основе полупроводников с многозарядной примесью обладают рядом особенностей, позволяющих, во-первых, использовать их для измерения нескольких воздействий различной физической природы [1], и во-вторых, возможностью внутреннего автоматического или внешнего управления поддиапазонами измерения [2], что приводит к расширению динамического диапазона измерения. Выбор основного материала сенсора и его структуры [2, 3] позволяет обеспечить совокупность свойств сенсора, наиболее полно обеспечивающую его пригодность для решения конкретной измерительной задачи. При этом для управления преобразовательными характеристиками сенсоров с приборной структурой фоторезистора удобно использовать дополнительное оптическое излучение, а при использовании транзисторных структур можно применять как оптическое излучение, так и электрические управляющие сигналы [2]. Как правило, транзисторные структуры чувствительны к более широкому набору входных факторов различной физической природы [3, 4]. Кроме того, фоторезисторные сенсорные структуры имеют переключательный характер управляющих характеристик, а для транзисторных структур реализуются управляющие характеристики, позволяющие регулировать чувствительность к выбранному фактору в широком (до сотен раз) диапазоне [2]. В большинстве случаев переключение между поддиапазонами измерения возможно как в ручном, так и в автоматическом режимах.

Таким образом, процедура измерения должна начинаться с выбора режима управления: ручной или автоматический, а затем выбора фактора и интенсивности управляющего воздействия (рисунок 1).

Процедура измерения начинается с выбора решения (блок 1): автоматический или ручной выбор режима измерения. В случае применения мультипараметрических сенсоров это соответствует выбору физической природы входного фактора, формирующего измерительный сигнал [4]. В ручном режиме дешифрируются сигналы управления

и выбирается (блок 6) тип и интенсивность сигнала, управляющего сенсором F_j .

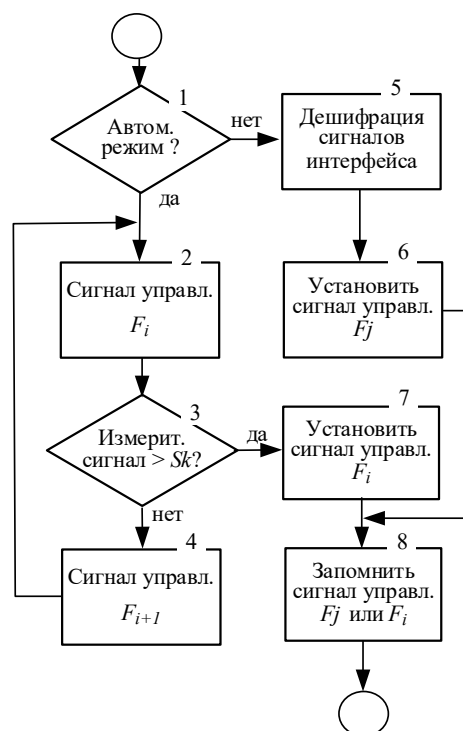


Рисунок 1 – Алгоритм выбора режима измерения

В автоматическом режиме измерения производится перебор типов и интенсивности сигналов, управляющих сенсором (блоки 2–4), до тех пор, пока измерительный сигнал не превысит некоторый критериальный порог Sk . Таким образом реализуется режим измерения того входного фактора, к которому сенсор наиболее чувствителен. При этом на выбор физической природы входного фактора, формирующего измерительный сигнал, влияет порядок перебора сигналов управления. Этот порядок, в зависимости от конструкции измерительного преобразователя, может изменить оператор или программист.

В конце процедуры выбора режима измерения (блок 8) в измерительном преобразователе производится запись сигнала управления F_j или F_b , в зависимости от того какой режим был установлен: ручной или автоматический, соответственно.



Рисунок 2 – Алгоритм измерения многодиапазонного сенсора

Сенсоры на основе полупроводников с многозарядной примесью характеризуются наличием не-

скольких поддиапазонов измерения энергетической и спектральной преобразовательных характеристик. Это вынуждает использовать в процедуре измерения режимы ручного или автоматического выбора поддиапазонов преобразовательных характеристик (рисунок 2). При использовании автоматического режима необходимо учитывать, что в каждом поддиапазоне преобразовательные характеристики линейны, но имеют свои значения коэффициентов преобразования. В представленном алгоритме это решается блоками (15–18). В ручном режиме можно выделить блок 20, определяющий тип и интенсивность управляющего сигнала, влияющего на начальную заселенность уровней многозарядной примеси [1].

В целом, процедура измерения при использовании мультипараметрических сенсоров характеризуется разветвлениями алгоритма для ручного и автоматического режимов измерения.

Литература

1. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
2. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2023. – № 1. – С. 37–45.
3. Бурункова, Ю. Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
4. Комбинированный оптико-магниторекомбинационный преобразователь / Р. И. Воробей [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники: материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г.* / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.). – Минск: БГУ, 2023. – С. 47–52.

УДК 621.383

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В., Тявловский К. Л., Шадурская Л. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Одним из способов решения задач оптической диагностики является использование фотоэлектрических сенсоров на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими несколько уровней с разными зарядовыми состояниями. Рассмотрены особенности структур транзисторных мультипараметрических сенсоров. Транзисторные структуры расширяют возможности резистивных и однобарьерных мультипараметрических сенсоров.

Ключевые слова: транзистор, сенсор, мультипараметрический сенсор, глубокая примесь, преобразовательная характеристика, измерительный преобразователь.

TRANSISTOR STRUCTURES-BASED MULTI-PARAMETRIC SENSORS

Vorobey R. I., Gusev O. K., Pantsialeu K. U., Tyavlovsky K. L., Shadurskaya L. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. One of the ways to solve tasks of optical diagnostics is to use photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurities, which form several energy levels with different charge states. Peculiarities of transistor-based multi-parametric sensors' structures are discussed with

respect to this. It is found that transistor structures widen capabilities of resistive and single-junction multi-parametric sensors.

Keywords: transistor, sensor, multi-parametric sensor, deep impurity, characteristic curve, measurement transducer.

Адрес для переписки: Тявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Сенсоры на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, содержащих малую концентрацию многозарядной примеси, характеризуются возможностью управления преобразовательными характеристиками и чувствительностью к нескольким входным факторам различной физической природы [1, 2]. Базовую приборную структуру таких сенсоров составляют фоторезистивные структуры с использованием дополнительного оптического излучения для управления переключением между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристик чувствительности [2]. Отметим, что для резистивных и однобарьерных сенсорных структур характеристики управления энергетической и спектральной характеристиками чувствительности имеют переключательный вид, а число поддиапазонов управления соответствует количеству зарядовых состояний примеси [1].

Сохранить основные свойства мультипараметрических сенсоров и реализовать непрерывную характеристику управления позволяет использование транзисторных структур. При этом недостаточно использовать в традиционной структуре транзистора материал с уникальными свойствами полупроводника с многозарядной примесью [1, 3]. В транзисторных сенсорных структурах [4] эффективным является использование влияния управляющего воздействия на траекторию движения носителей заряда (рисунок 1). При этом реализуется непрерывная характеристика управления в динамическом диапазоне до нескольких сотен-тысяч, причем не исключается и дискретный вид характеристики управления [4].

Как и при конструировании сенсоров на основе резистивной структуры, для транзисторных сенсоров характерно использование широкого спектра материалов [1, 3]. Это приводит к возможности, и даже необходимости, применения операций некремниевых технологий [2, 5], например при использовании сапфировой подложки. Другим вариантом является применение совокупности операций глубокого травления и последующего выращивания материалов типа A_3B_5 с сошлифовыванием лишнего материала для планаризации. Затем в кармане, заполненном A_3B_5 , формируется светодиодная структура (рисунок 2). При глубоком травлении используется ряд травителей, формирующих, как на рисунке, «катушечный» профиль. Такая геометрия обеспечивает компенсацию различий в свойствах разнородных материалов [1, 3], используемых в управляемых мультипараметрических сенсорах.

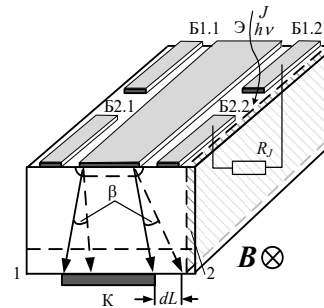


Рисунок 1 – Оптико-магнитный сенсор на основе биполярного транзистора

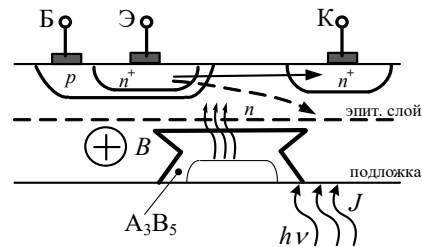


Рисунок 2 – Структура оптикомагнитного сенсора на основе биполярного гальваноманниторекомбинационного транзистора

При этом в таких сенсорах реализуется возможность управления чувствительностью к выбранному фактору как внешним оптическим излучением, так и излучением встроенного светодиода. В зависимости от выбранного режима в качестве входных параметров могут использоваться, например [2, 4], магнитное поле B или параметры оптического излучения: интенсивность и длина волны (рисунок 2).

Так как чувствительность сенсора к оптическому излучению определяется процессами рекомбинации в каждом из зарядовых состояний, а каждое зарядовое состояние характеризуется отличающимися параметрами [1], то это позволяет создавать фотоприемники с различными функциональными возможностями на основе ряда одноэлементных сенсорных структур.

Проявлением фоточувствительности сенсорной структуры полевого транзистора с каналом в полупроводнике с многозарядной примесью [2] является смещение сток-затворной характеристики и изменение значения напряжения отсечки при изменении освещенности активной области. При этом дополнительной управляющей подсветкой можно изменять и вид спектральной характеристики чувствительности, переключая значение «красной» границы. Вывод затвора может быть

использован как управляющий электрод либо как электрод-контакт с исследуемой жидкой средой (биологическим объектом), например, через иммерсионную жидкость [3].

Благодаря изменению свойств активной области сенсора вследствие особенностей свойств зарядовых состояний одного примесного центра возможно управление характеристиками одноэлементного сенсора, чувствительного к входным факторам различной физической природы. Таким образом, приборные структуры на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси, формирующей в запрещенной зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, позволяют создавать фотоэлектрические преобразователи с большим динамическим диапазоном энергетических и спектральных характеристик.

Измерительные преобразователи на базе одноэлементных мультипараметрических фотоэлектрических сенсоров позволяют реализовать линейные характеристики преобразования в широком динамическом диапазоне изменения входных факторов путем выбора и объединения линейных участков характеристик преобразования сенсоров, входящих в состав преобразователя

[4]. При этом увеличение динамического диапазона энергетической характеристики достигается не менее, чем в два раза по логарифмической шкале преобразовательной характеристики, с соответствующим увеличением разрядности кода результата преобразования.

Литература

1. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
2. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // *Не разрушающий контроль и диагностика*. – 2023. – № 1. – С. 37–45.
3. Бурункова, Ю. Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
4. Комбинированный оптико-магниторекомбинационный преобразователь / Р. И. Воробей [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники: материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г.* / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Мн.: БГУ, 2023. – С. 47–52.
5. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев. – Киев: Макрос, 2011. – 560 с.

UDC 681

DESIGN AND ANALYSIS OF A MICROSTRIP ANTENNA IN SUB-6 GHz WIMAX BAND WBAN APPLICATIONS Atul R. Chaudhari^{1,3}, Dipak P. Patil²

¹Research Scholar, Sandip Institute of Technology and Research Centre, Nashik, India

²Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik, India

³Savitribai Phule Pune University, Pune, India

Abstract. This paper proposes a flexible microstrip patch antenna for WBAN applications in the WiMAX 5.8 GHz band. The antenna is assembled on a flexible Rogers RO 4350 substrate. This makes it good for wearable and conformal systems. The antenna has a notch structure and parasitic patches placed around the main radiating element to improve radiation efficiency and impedance bandwidth. These changes help to control the distribution of surface current, lower return loss, and expand the usable frequency band while keeping the size small. The simulated and equivalent circuit result are compared. A stable gain, and good reflection coefficient of -28.07 dB & simulated 1.05 GHz bandwidth at 5.8 GHz resonant frequency, which makes it reliable for users in WiMAX applications for non-medical WBAN environments.

Keywords: WiMAX, WBAN, equivalent circuit, Notch, Parasitic patch.

e-mail: ar.chaudhari1@gmail.com

Introduction. Microstrip patch antennas are widely preferred for wearable applications because of their low profile, lightweight, and planar geometry, making them suitable for integration with flexible substrates. However, traditional microstrip antennas often face challenges in narrow bandwidth, low gain, and high Specific Absorption Rate (SAR). However, microstrip antennas present inherent challenges, including limited bandwidth, low power handling capabilities, and potential losses at open boundaries, which require sophisticated design methodologies to overcome for optimal performance in dynamic WBAN environments [1]. Addressing these limitations, researchers have focused on innovative design strategies, such as employing metamaterials and modified patch structures, to enhance

bandwidth and gain while minimizing the electromagnetic coupling effects between the antenna and the human body [2]. Further research is exploring the use of parasitic elements and ground plane modifications to broaden the operational bandwidth and improve the impedance matching of microstrip antennas for WBANs, especially given the dynamic changes in the surrounding environment [3]. The antenna comprised a primary radiating patch, a vertical metal wall, modified L-probe feeds, and an auxiliary parasitic patch. The main patch was capacitively energized by the two feeds. The suspended patch antenna was designed for operation within the 3.3–3.8 GHz frequency range utilized by 5G networks [4]. The non-medical applications as wearable sensors and include Motion Detection, which is utilized to

detect, capture, recognize, and identify body gestures and motions and send alerts to the application's owner [5].

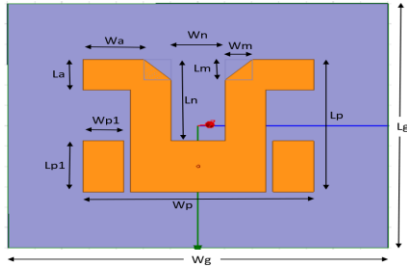


Figure 1 – Antenna Geometry

Antenna Configurations. A rectangular microstrip antenna to be resonates at 5.8 GHz, and its dimensions are $W_g = 28$, $L_g = 24$, $W_p = 17$, & $L_p = 13$, all in mm, determined by [6]. The rectangular notch in the radiating edge of the main patch is introduced, Parasitic patches are situated in close proximity to the primary patch. The antenna employs a microstrip line feed, which was chosen for its ease of integration with flexible substrates and its simplicity in fabrication. HFSS full-wave electromagnetic solvers are employed to simulate the antenna design.

The equivalent circuit model of proposed antenna. As per circuit theory, a simple rectangular microstrip antenna consists of parallel combination of resistance, inductance, and capacitance. The values of patch resistance (R_1), patch capacitance (C_1), and patch inductance (L_1) given in [6]. It may be noted that the notch is symmetrically with length of patch, that makes two resonant circuits are coupled through mutual inductance (L_m) and mutual capacitance (C_m) expressed as [6],

$$L_m = \frac{C_p^2(L_1 + L_2) + \sqrt{C_p^2(L_1 + L_2)^2 + 4C_p^2(1 - C_p^2)L_1L_2}}{2(1 - C_p^2)},$$

$$C_m = -\frac{(C_1 + C_2) + \sqrt{(C_1 + C_2)^2 - 4C_1C_2(1 - C_p^{-2})}}{2},$$

$$C_p = \frac{1}{Q_1Q_2}$$

As the dimensions of both resonant circuits are same, each arm modeled as the separate resonant circuit it consisting the 90° bend discontinuities it introduces the inductance & shunt capacitance due to corner and edge current disturbances occurs, which gives to rise series inductances [6]. Calculated as [7],

$$\frac{C}{W} (pF/m) = (9.5\epsilon_r + 1.25) \left(\frac{W}{h} \right) + 5.2\epsilon_r + 7,$$

$$\frac{L}{h} (nH/m) = 100 \left(4 \sqrt{\frac{W}{h}} = 4.21 \right),$$

The calculated values of lumped components are L_f 1nH, R_f 0.73 Ω , C_f 1pF, C_a 1pF, C_b 1pF, C_p 0.11pF, R_1 1.4 Ω , L_1 1.31nH, C_1 1.1pF, L_3 1.9nH, L_4 0.8nH, C_3 0.59pF, R_2 1.4 Ω , L_2 1.31nH, C_2 1.1pF, L_5 1.9nH, L_6 0.8nH, C_4 0.59pF. Small amounts of positive and negative charges build up on the bent surfaces of the transmission lines thereby causing capacitance to develop

across the line. This results in a change in the impedance of the transmission line, which causes a mismatch at the load. This mismatch causes a fraction of the signal on the line to be reflected back towards its source which reduces the overall system performance. To eliminate transmission line bend capacitance mitering cuts a line segment at an angle to reduce capacitance at the bend.

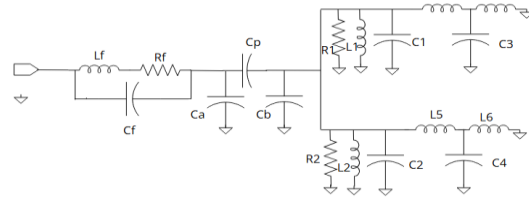


Figure 2 – Equivalent circuit model

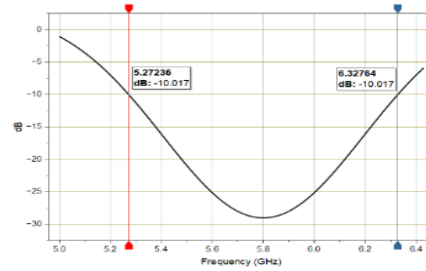


Figure 3 – Impedance Bandwidth (Simulated)

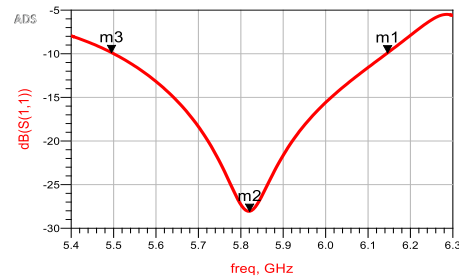


Figure 4 – Impedance Bandwidth (Equivalent circuit)

Result and Discussions. The proposed antenna design result, as illustrated in Figure 4, has a reflection coefficient of -28.07 dB and a bandwidth of 1.05 GHz at 5.8 GHz resonant frequency through the variation of notch length and width, is varied by means of parametric analysis technique in the HFSS tool. Initially, notch length and width is taken as 7 mm. & 3 mm respectively with this, the antenna resonate at 4.9 GHz is observed.

Then, the notch length & widths are tuned by considering the alteration in surface current distribution.

Conclusion. The optimized notch length & width is 8 mm & 4 mm respectively, it gives better reflection coefficient for the 5.8 GHz resonating frequency. Shorter length and wider width of parasitic patch resonate at higher frequency by providing more capacitance at ends, leading to increase the bandwidth is observed in equivalent circuit analysis.

References

1. Singh, A. S. Design of Y-shaped tri-band rectangular slot DGS patch antenna at sub-6 GHz frequency range for 5G communication / A. S. Singh, S. K. Joshi // Journal of Engineering and Applied Science. – 2024. – № 1. – 18 p.

2. Zhang, K. Meta-Wearable Antennas – A Review of Metamaterial Based Antennas in Wireless Body Area Networks / K. Zhang, P. J. Soh, S. Yan // *Materials*. – 2020. – Vol. 14, № 1. – 32 p.

3. Compact 2.4 GHz L-Shaped Microstrip Patch Antenna for ISM-Band Internet of Things (IoT) Applications / M. F. Zambak [et al.]. – 2023. – 8 May. – 16 p.

4. Ciydem, M. Dual-polarization wideband sub-6 GHz suspended patch antenna for 5G base station / M. Ciydem, E. A. Miran // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2020. – Vol. 19, № 7. – P. 1142–1146.

5. Wireless body area networks: A survey / S. Movassaghi [et al.] // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. – 2014. – Vol. 16, № 3. – P. 1658–1686.

6. Koc Polat, H. Modeling and validation of a new reconfigurable patch antenna through equivalent lumped circuit-based design for minimum tuning effort / H. Koc Polat, M. D. Geyikoglu, B. Cavusoglu // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2020. – V. 62, № 2. – P. 890–898.

7. Garg, R. Microstrip antenna design handbook / R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahal, A. Ittipiboon. – Norwood: Artech House, 2001. – 866 p.

УДК 681.325

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК

Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Многослойный термоэлектрический холодильник структурно содержит термоэлектрический преобразователь с омическими контактами и внешними электрическими выводами. Термоэлектрический преобразователь реализован на основе широкозонных полупроводников и включает последовательно соединение п-р-гомопереход, вариозный слой, изотопный р-р⁺ – гетеропереход, сильно легированные п⁺ и р⁺ слои, при этом толщина областей п-р – гомоперехода составляет (0,5–0,9) L_d, толщина вариозного слоя равна (0,3–0,5) L_d, а толщина изотопного гетероперехода составляет (0,4–0,7) L_d, где L_d – диффузионная длина пробега электронов. **Ключевые слова:** термоэлектрический холодильник, р-п-переход, широкозонный полупроводник, гомопереход, вариозный слой, термоэлектрический преобразователь, гетеропереход, омический контакт.

SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC REFRIGERATOR

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The multilayer thermoelectric refrigerator structurally comprises a thermoelectric converter with ohmic contacts and external electrical terminals. The thermoelectric converter is implemented based on wide-bandgap semiconductors and includes a series-connected n-p homojunction, a variozed layer, an isotopic p-p⁺ heterojunction, and heavily doped n⁺ and p⁺ layers. The thickness of the n-p homojunction regions is (0.5–0.9)L_d, the thickness of the variozed layer is (0.3–0.5)L_d, and the thickness of the isotopic heterojunction is (0.4–0.7)L_d, where L_d is the electron diffusion mean free path.

Keywords: thermoelectric refrigerator, p-n junction, wide-bandgap semiconductor, homojunction, variozed layer, thermoelectric converter, heterojunction, ohmic contact.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: bntu@bntu.by

Полупроводниковый термоэлектрический холодильный элемент является базовым модулем полупроводниковых термохолодильников, функционирующих на эффекте Пельтье.

Используется термоэлектрический холодильник [1], который содержит несколько термоэлектрических модулей, каждый из которых составлен из множества объединенных попарно термоэлектрических элементов. На одной стороне каждого модуля имеется рабочий канал, на другой стороне модуля расположен теплообменник, в модуле размещены р-п-структуры. Такой термоэлектрический преобразователь обладает сложной конструкцией и невысокими техническими параметрами.

Создан также термоэлектрический холодильник [2], который содержит ленту с проводящей полоской, из которой формируют матрицу контактов для первой стороны термоэлектрического холодильника. Матрица контактов прикреплена к изолирующей пластине, представляющей плату

термопреобразователя. Термоэлектрические элементы р-п-типа проводимости, расположенные между контактами платы и выводами, содержат р-п-переход с примыкающими р- и п-полупроводниковыми областями, и омическими контактами.

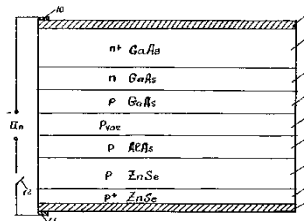


Рисунок 1 – Структурная схема термоэлектрического холодильника

Такого типа полупроводниковые холодильники обладают сложной конструкцией, содержащей множество конструктивных элементов, невысокой стабильностью работы из-за большого числа коммутирующих соединений.

Нами разработан полупроводниковый многослойный термоэлектрический холодильник (МТЭХ), обладающий высокими электрофизическими параметрами. Структура термоэлектрического холодильника изображена на рисунке 1.

Конструктивно МТЭХ состоит из p^+ -основания 1, сформированного из широкозонного полупроводника, например арсенида галлия, на котором создан p -гомопереход из того же материала, включающий n -слой 2 и p -слой 3, p -слой 2 сильно легирован до уровня, когда дно зоны проводимости E_c выходит на уровень Ферми E_F , что обеспечивает высокую инжекцию электронов из p -слоя 2 в p -слой 3 p -гомоперехода и рост его потенциального барьера, повышающего суммарный потенциальный барьер термоэлектрического преобразователя.

p -слой 3 контактирует с варизонным Pu_{az} -слоем 4, который соединен с p -слоем 5 широкозонного полупроводника, запрещенная зона которого E_{g2} больше запрещенной зоны E_{g1} p -слоя 3. Структура p -слой 3 - $Pvar$ -слой 4- p -слой 5 представляет изотипный гетеропереход. На p -слое 5 широкозонного полупроводника сформирован p -слой 6 более широкозонного полупроводника, например селенида цинка, причем структура p -слой 5 - p -слой 6 представляет также изотипный гетеропереход. P -слой 6 наиболее широкозонного полупроводника контактирует с сильнолегированным p^+ -слоем 7 из того же материала. На сильнолегированных p^+ -основании 1 и p^+ -слое 7 размещены соответственно металлические слой 8 и слой 9 - омические контакты, которые жестко связаны с внешними выводами 10 и 11 и с помощью электронного коммутатора 12 подключаются к внешнему источнику питания U_n .

Для получения изотипного гетероперехода с высоким коэффициентом передачи электронов на p -слой 3 нанесен варизонный $Pvar$ -слой 4 методом жидкофазной или газифазной эпитаксии, который согласовывает p -слой 3 и p -слой 5 по постоянным кристаллических решеток и исключает разрыв энергетических зон изотипного p - p -гетероперехода, включающего p -слой 3 и p -слой 5.

На варизонном $Pvar$ -слое 4 методом жидкофазной или газифазной эпитаксии сформирован p -слой 5 широкозонного полупроводника типа $AmBn$, например $AlAs$, толщиной $(0,4...0,7)$ L_d , легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = 10^{16}...10^{17} \text{ см}^{-3}$. На p -слой 5 p -типа проводимости для увеличения высоты суммарного потенциального барьера и, соответственно, температуры охлаждения нанесен методом молекулярнолучевой эпитаксии с одновременным легированием акцепторной примесью Cu монокристаллический p -слой 6 с максимальной шириной запрещенной зоны, например селенид цинка с $E_g \sim 2,67 \text{ эВ}$. Расхождение в постоянные решетки Δa для изотипного p - p -гетероперехода из контактирующих материалов

$pAlAs$ - $pZnSe$, составляет 1,3 %, поэтому потери носителей заряда (электронов) в нем будут минимальны. P -слой 6 легирован акцепторной примесью (для $ZnSe$ это медь) с концентрацией $10^{16}...10^{18} \text{ см}^{-3}$. Ширина p -слоя 6 определяется полным поглощением в нем тепловой энергии решетки электронами, экстрагируемыми из p -слоя 2 в p -слой 6, и, как показали результаты эксперимента, составляет $(2...5) L_d$.

Сильнолегированный p^+ -слой 7 представляет часть p -слоя 6, который сформирован путем введения методом ионной имплантации ионов меди с последующей их терморазгонкой акцепторной примеси до величины $N_A = 10 \text{ см}^{-3}$, обладает малым сопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем 9.

Количество поглощаемой инжектированными электронами из p -слоя 2 в p -слой 6 тепловой энергии зависит от высоты суммарного потенциального барьера

$$\Sigma\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \text{ (эВ)}, \quad (1)$$

где ϕ_1 – потенциальный барьер $nGaAs$ - $pGaAs$ гомоперехода; $\phi_2 = E_{g2} - E_{g1}$ – потенциальный барьер $pGaAs$ - $pAlAs$ изотипного гетероперехода; $\phi_3 = E_{g3} - E_{g2}$ – потенциальный барьер изотипного $pAlAs$ - $pZnSe$ гетероперехода. Суммарный потенциальный барьер, определяющий отрицательную температуру, количественно равен $\phi_{\Sigma} = 1,43 + 0,72 + 0,52 = 2,67 \text{ эВ}$.

Для обеспечения максимальной инжекции электронов из p -слоя 2 в p -слой 6 широкозонных полупроводников, то есть для исключения потерь электронов при их инжекции через гомопереход и изотипные p - p -гетеропереходы, ширина изотипных гетеропереходов $V_d = (0,6...0,9)W_0$, где W_0 – суммарная толщина его обедненных областей, выбрана из условия, чтобы обедненные области переходов проникали внутрь варизонного Pu_{az} -слоя 4, исключая появление потенциального барьера в валентной зоне и зоне проводимости в области p - p -гомоперехода и p - p -изотипного перехода.

При подаче напряжения прямой полярности U_n через электронный коммутатор 12 на внешние выводы 10 и 11 МТЭХ p -слой 2 начинает эффективно инжектировать через p - p -переход и изотипные p - p -гетеропереходы электроны в p -слой 6. Поскольку гомопереход и изотипные гетеропереходы соединены последовательно и ток в цепи остается неизменным, то результирующий ток определяется из выражения и экспоненциально возрастает

$$I = L_s [\exp(eU_n/KT) - 1] \quad (2)$$

с повышением питающего напряжения. В (2) I_s – ток насыщения перехода; e , K , T – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. Инжектирующие в p -слой 6 электроны на расстоянии двойной диффузионной длины $(2L_d)$ поглощают из кристаллической решетки этого

слоя 6 энергию и повышают ее до величины энергии электронов р-слоя 6. В результате отбора энергии инжектированными электронами от кристаллической решетки р-слоя 6 температура в нем и соответственно в МТЭХ понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_p = \Pi I t, \quad (3)$$

где Π – коэффициент Пельтье; $I = JS$ – ток, протекающий через изотипный рAlAs-рZnSe-гетеропереход сечением S ; t – время протекания тока. Коэффициент Пельтье структуры МТЭХ из невырожденных полупроводников определяется из зависимости:

$$\Pi = A(KT/e) \ln(n_n/n_p) \quad (4)$$

где A – коэффициент, учитывающий соотношение энергии электронов в п- и р-слоях; n_n, n_p – концентрация собственных электронов в п-слое 2 и р-слое 6.

Повышение диапазона рабочих отрицательных температур в предложенном многослойном термоэлектрическом холодильнике обусловлено существенным повышением суммарного потенциального барьера Φ_{Σ} коэффициента Пельтье и соотношением электронов в п-слое 2 и р-слое 6. С учетом выражения (4), при условии $A > 2$, соотношением $\ln(n_n/n_p) < 4$, поглощаемая

тепловая энергия в предлагаемом термоэлектрическом холодильнике по сравнению с аналогами возрастает в $N = 2 \cdot 10/4 = 5$ раз.

Экспериментальный многослойный термоэлектрический холодильник размером его термопреобразователя 10×10 мм при плотности прямого тока 1 А/см^2 позволяет получать предельную температуру охлаждения -25°C , расчетная надежность безотказной работы термохолодильника составляет $\sim 10^5$ ч. Техничко-экономические преимущества предлагаемого многослойного термоэлектрического холодильника в сравнении с аналогами:

- Более чем в два раза возрастает предельная температура охлаждения.
- Более чем в три раза повышается стабильность работы термоэлектрического холодильника.
- Существенно упрощается конструкция термоэлектрического холодильника.

Литература

1. Пат. 4134803 США, МПК H01L 35/28. Термоэлектрический модуль / J. C. Bowers, S. L. Kearney (заявитель: Minnesota Mining and Manufacturing Company). – № 05/811452; заявл. 28.06.1977; опубл. 16.01.1979.
2. Пат. 5064476 США, МПК H01L 35/34. Термоэлектрический охлаждающий прибор / R. A. Birkholz, D. E. Hein. – № 07/625,841; заявл. 10.12.1990; опубл. 12.11.1991.

УДК 631.3

УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Преобразователь солнечной энергии в электрическую содержит фоточувствительную $p^+-p-i-p^+$ -структуру из широкозонного полупроводника, реализованную в виде совокупности сформированных на расстоянии от 10 до 100 мкм друг от друга столбиков диаметром 50–100 мкм и высотой от 10 до 150 мкм каждый, нижний p^+ -слой представляет полупроводниковую подложку заданной толщины и электрически соединен с металлическим основанием, а на p^+ -слой нанесен электропроводящий просветляющий слой, на котором сформирован внешний металлический вывод.

Ключевые слова: преобразователь солнечной энергии, фоточувствительная структура, широкозонный полупроводник, р-п переход, полупроводниковый столбик, полупроводниковая подложка, носители заряда, металлическое основание.

DEVICE FOR CONVERTING OPTICAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A solar energy to electrical energy converter contains a photosensitive $p^+-p-i-p^+$ structure made of a wide-bandgap semiconductor, implemented in the form of a set of columns formed at a distance of 10 to 100 μm from each other, each with a diameter of 50–100 μm and a height of 10 to 150 μm , the lower p^+ layer is a semiconductor substrate of a given thickness and is electrically connected to a metal base, and an electrically conductive antireflection layer is applied to the p^+ layer, on which an external metal lead is formed.

Keywords: solar energy converter, photosensitive structure, wide-bandgap semiconductor, p-n junction, semiconductor pillar, semiconductor substrate, charge carriers, metal base.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: bntu@bntu.by

Устройство преобразования оптической энергии в электрическую относится к полупроводни-

ковым фоточувствительным приборам с потенциальным барьером, и используется в электронно-

оптических и космических системах в качестве автономных источников электроэнергии.

Известен преобразователь солнечной энергии на полупроводниковых р-п-структурах [1, 2]. Однако они обладают сложной конструкцией и невысоким коэффициентом преобразования оптической энергии в электрическую.

Создано устройство преобразования оптической энергии в электрическую, позволяет существенно повысить выходной электрический ток, и выходную мощность. На рисунке 1 изображена конструкция преобразования оптической (солнечной) энергии в электрическую (ПОЭЭ).

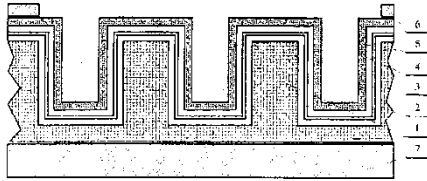


Рисунок 1

Конструктивно ПСЭЭ состоит из полупроводниковой р⁺-р-и-п⁺ фоточувствительной структуры, включающей п⁺-слой 1 широкозонного полупроводника (подложка), на которой последовательно размещен i-слой 2 собственной проводимости, р-слой 3 и р⁺-слой 4, которые выполнены из того же широкозонного полупроводника. На сильнолегированном р-слое 4 сформирован проводящий слой 5 из светопрозрачного материала, одновременно являющийся просветляющим слоем. На проводящий слой 5, являющийся омическим контактом к р-слою 4 широкозонного полупроводника, нанесен внешний металлический вывод 6. п⁺-слой 1 широкозонного полупроводника размещен на металлическом основании 7, являющимся внешним выводом ПСЭЭ.

i-слой 2 фоточувствительной структуры ПСЭЭ, который с р-слоем 3 создает первый резкий р-п переход, изготавливается из широкозонного полупроводника, обладающего высокой подвижностью носителей заряда, большой их диффузионной длиной, низкой концентрацией собственных носителей и возможностью создавать в его объеме сильнолегированные слои, например из арсенида галлия, фосфида галлия или кремния. 8 нем под воздействием солнечного излучения генерируются пары электрон-дырка. Толщина i-слоя 1 определяется максимумом генерации носителей заряда и минимумом потерь этих носителей, достигающих второго i-n перехода, где происходит разделение носителей заряда, то есть электроны дрейфуют в п⁺-слой 1, а дырки диффундируют к р⁺-слою 4 широкозонного полупроводника. Толщина i-слоя 2 зависит от диффузионной длины фотогенерированных носителей заряда L_d и составляет величину (0,5÷0,9) L_a. р-слой 3 широкозонного полупроводника легирован акцепторной примесью с концентрацией

(10¹⁶..10¹⁷) см⁻³, его толщина обуславливается максимальным переносом фото-инжектированных в i-слой 2 носителей к р⁺-слою 4. Как показали результаты эксперимента, толщина р-слоя 3 широкозонного полупроводника составляет (0,2–i–0,4) L_d. Сильнолегированный р⁺-слой 4 широкозонного полупроводника сформирован на р-слое 3 путем введения акцепторной примеси с высокой концентрацией N_A ≅ (10²⁰÷10²¹) см⁻³, обладает малым электросопротивлением и обеспечивает омический контакт с проводящим слоем 5 из светопрозрачного прозрачного материала, например окиси олова-индия, который одновременно является просветляющим слоем. Слой 5 выполнен толщиной 1÷1,5 микрон.

п⁺-слой 1 широкозонного полупроводника сильно легирован донорной примесью до концентрации N_d ≅ (10²⁰÷10²¹) см⁻³, он является полупроводниковой подложкой, обладающей толщиной (0,1÷0,2) мм. Своей нижней частью он с помощью электропроводящего клея установлен на металлическом основании 7, выполняющем функцию нижнего внешнего электрода ПСЭЭ. Для увеличения активной поверхности фото чувствительной структуры, что приводит к существенному повышению плотности выходного тока и выходной электрической мощности, ее активная поверхность выполнена столбиковой, причем первичная столбиковая структура сформирована методом фотолитографии на п⁺-слое 1, то есть на полупроводниковой подложке, на столбиковую поверхность которой последовательно методом газовой фазной эпитаксии нанесен i-слой 2, р-слой 3, i-слой 4 и методом ионного распыления – электропроводящий слой 5 из светопрозрачного материала.

В соответствии с результатами расчета оптимальная высота столбиков диаметром 40 микрон составляет 100 микрон, а расстояние между столбиками 10 микрон.

В результате суммарная площадь активной поверхности фоточувствительной структуры повышается более чем в 5 раз, в таком соотношении возрастает плотность выходного электрического тока и выходная мощность.

При воздействии квантов света на рабочую поверхность фоточувствительной структуры ПСЭЭ со стороны электропроводящего просветляющего слоя 5 фотоны с энергиями E_v ≥ E_g, где E_g - ширина запрещенной зоны широкозонного полупроводника, проходят просветляющий слой 5, тонкий р⁺-слой 4 широкозонного полупроводника, р-слой 3, достигают i-слоя 2 собственной проводимости и создают в р-слое 3 и i-слое 2 широкозонного полупроводника избыточную концентрацию носителей заряда. Избыточная концентрация фотогенерированных электронов и дырок в р-слое и i-слое 2 определяется из зависимости:

$$\Delta n = \beta \eta I_v \tau_n, \Delta p = \beta \eta I_v \tau_p, \quad (1)$$

где β – квантовый выход, η – коэффициент поглощения света в р-слое 3 и i-слое 2, I_v – интенсивность света, τ_n , τ_p – время жизни избыточных электронов и дырок. Фотогенерированные электроны и дырки разделяются электрическим полем первого р-i перехода и второго i-n⁺ перехода, причем дырки движутся к верхнему омическому контакту – проводящему слою 5, а электроны – к p⁺-слою 1, выполняющему функции нижнего омического контакта СПЭЭ.

Вследствие разделения зарядов на последовательно соединенных р⁺-i и i-переходах возникает суммарное фото ЭДС U_d , максимальное значение которой при холостом ходе:

$$U_{d_{\max}} = \ln(I_\phi / I_s) kT / e, \quad (2)$$

и течет ток через i-n⁺ переход, обусловленный оптически генерированными электронами и дырками:

$$I_a = I_s \left[\exp \frac{eU_d}{kT} - 1 \right] - I_\phi. \quad (3)$$

Здесь I_ϕ – максимальная плотность фототока, соответствующая данной освещенности; I_s – ток насыщения р-n перехода.

В общем случае при заданной интенсивности света фототок, обусловленный избыточными носителями заряда с концентрациями Δn и Δp , определяется выражением:

$$I_\phi = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) U_d. \quad (4)$$

Величина фото ЭДС ПСЭЭ определяется суммарной высотой потенциальных барьеров р-i и второго i-n⁺ переходов и составляет величину (0,8÷1,0) В для кремния.

Создано экспериментальное устройство – преобразователь солнечной энергии в электрическую размером 48х48 мм на основе широкозонного полупроводника – кремния, который может использоваться как элемент-модуль солнечной электростанции. Устройство выполнено структурой р-i Si-резкий переход i-n⁺ Si-резкий переход с верхним омическим контактом из проводящего светопрозрачного слоя 5, изготовленного из окиси олова-индия. р⁺-слой 4 выполнен толщиной 0,1 микрон из кремния, легированном бором до концентрации $N_A \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ р⁺-слой 3, контактирующий с р⁺-слоем 4, сформирован путем легирования бором с концентрацией $N_A \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Его толщина составляет 0,3 микрона, i-слой 1 представляет кремний собственной

проводимости, его толщина выбрана из условия максимального поглощения, проникающего в слой солнечного излучения, и составляет толщину 1,2 микрона, р-i переход выполнен резким с суммарной шириной обедненных областей 0,5 микрона, i-n переход также выполнен резким с суммарной толщиной 0,3 микрона. Сильнолегированный p⁺-слой 1 выполнен из кремния, он легирован донорной примесью до концентрации $N_D \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$, его толщина соответствует толщине подложки и равна 0,2 мм. На верхний омический контакт – проводящий слой 5 нанесен внешний электрический вывод 6 ПСЭЭ, представляющий собой алюминия + никель толщиной 2 микрона и шириной 2 мм по периметру края проводящего слоя 5. Конструкция фоточувствительной структуры ПСЭЭ размещена на алюминиевом основании 7 размером 48 × 48 мм, толщиной 1 мм и соединена с ним токопроводящим клеем.

Экспериментальный полупроводниковый преобразователь солнечной энергии размером полезной площади 46х46 мм при интенсивности солнечного излучения $P_\Sigma = 65 \text{ мВт/см}^2$ позволяет получать рабочий ток I_s 1,2 А, рабочее напряжение 0,9 В, полезную выходную мощность $P_{\text{вых}} \approx 1,2 \text{ Вт} (> 480 \text{ Вт/м}^2)$.

Расчетная надежность безотказной работы ПСЭЭ составляет 10^5 часов. Для аналогов аналогичных размеров эти электрические параметры соответственно составляют: $I \approx 0,21 \text{ А}$, $P_{\text{вых}} = 0,15 \text{ Вт}$.

На базе предлагаемого ПСЭЭ при использовании матрицы элементов может быть создана солнечная батарея электрической энергии больших мощностей, используемая как автономный источник электроэнергии в стационарных, подвижных и космических объектах.

Литература

1. Пат. 02122259 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Способ изготовления фотоэлектрического преобразователя / А. В. Иванов, Б. П. Сидоров. – № 02122259; заявл. 15.03.2002; опубл. 10.08.2003, Бюл. № 22.
2. Пат. 4191593 США, МПК H01L 31/06. Полупроводниковый фотоэлектрический прибор / D. E. Carlson, C. R. Wronski. – № 05/683,819; заявл. 05.05.1976; опубл. 04.03.1980.
3. Пат. 9339 Беларусь, МПК H01L 31/06. Фотоэлектрический преобразователь / В. А. Коваленко, П. С. Никитин. – № a20010010; заявл. 02.01.2001; опубл. 30.08.2002, Бюл. № 4.

УДК 681.325

СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Способ изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии включает формирование на металлическом основании с внешним выводом слой диэлектрика, делящий основание на первую и вторую область, затем последовательно формируют из широкозонного полупроводника p⁺-слой на первой области основания, p⁺-слой на второй области основания, эпитаксиальный слой р-слой на n-слое, эпитаксиальный n-слой

на эпитаксиальном р-слое, формируют варизонный эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном р-слое и варизонный эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном п-слое, затем последовательно формируют из более широкозонного полупроводника эпитаксиальный п-слой на варизонном п-слое, эпитаксиальный р-слой на варизонном р-слое, наносят на полученную фоточувствительную структуру просветляющий слой и омические контакты.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, солнечная энергия, металлическое основание, диэлектрический слой, фоточувствительная структура, широкозонный полупроводник, эпитаксиальный слой, варизонный слой.

SYNTHESIS OF A SEMICONDUCTOR OPTICAL RADIATION CONVERTER

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A method for manufacturing a semiconductor solar energy converter includes forming a dielectric layer on a metal base with an external terminal, dividing the base into a first and a second region, then sequentially forming an n⁺ layer on the first region of the base from a wide-band semiconductor, a p⁺ layer on the second region of the base, an epitaxial p-layer on the n-layer, an epitaxial n-layer on the epitaxial p-layer, forming a graded-gap epitaxial p-layer on the epitaxial p-layer and a graded-gap epitaxial n-layer on the epitaxial n-layer, then sequentially forming an epitaxial n-layer on a graded-gap n-layer from a wider-band semiconductor, an epitaxial p-layer on a graded-gap p-layer, applying an antireflection layer and ohmic contacts to the resulting photosensitive structure.

Keywords: semiconductor converter, solar energy, metal base, dielectric layer, photosensitive structure, wide-band semiconductor, epitaxial layer, graded-gap layer.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: sychik@bntu.by

Способ изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии, в котором на металлическом основании с внешним выводом формируют слой диэлектрика, делящий основание на первую и вторую области для формирования первой и второй областей фоточувствительной структуры соответственно, последовательно формируют из одного и того же широкозонного полупроводника р⁺-слой на первой области основания, р⁺-слой на второй области основания, эпитаксиальный п-слой на р⁺-слое, эпитаксиальный р-слой на р⁺-слое, эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном п-слое, эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном р-слое, формируют варизонный эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном р-слое и варизонный эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном п-слое. Наносят на р- и п-варизонные слои через соответствующие маски соответственно слой р-типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5)10^{16} \text{ см}^{-3}$, и слой п-типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированного донорной примесью с $N_D = (1...5)10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$, а толщина этих слоев составляет 0,4 – 0,6 мкм.

На р- и п-слоях более широкозонного полупроводника формируют сильнолегированные слои более широкозонного полупроводника (AlAs): р⁺-типа слой, легированный акцепторной примесью с концентрацией $N_A = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$, и п⁺-типа слой, легированный донорной примесью с $N_D = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость формирования р⁺- и п⁺-слоев более широкозонного полупроводника составляет 20–30 Å/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На р⁺- и п⁺-слои более широкозонного полупроводника заданных размеров формируют просветляющий слой SiO₂ толщиной 0,05...0,15 мкм. Температура нагрева основания $T = 350...400^\circ\text{C}$.

Наносят на свободные от просветляющего слоя участки р⁺- и п⁺-слоев более широкозонного полупроводника электронно-лучевым напылением омические контакты путем последовательного нанесения на р⁺-слой структуры Cd-Al-Ni суммарной толщиной 1,5...2,0 мкм и на п⁺-слой структуры Te-Al-Ni общей толщиной 1,5...2,0 мкм. Завершающей операцией способа изготовления преобразователя солнечной энергии является термоотжиг сформированной структуры в инертной среде в течение 10...15 мин при температуре 300...450 °С для создания надежных омических контактов к р⁺- и п⁺-слоям широкозонного полупроводника (GaAs) и полупроводника (AlAs).

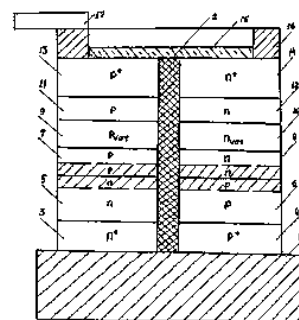


Рисунок 1 – Структура синтезируемого преобразователя солнечной энергии

Формирование полупроводниковых фоточувствительных приборов с потенциальным барьером относится к технологии изготовления преобразователей солнечной энергии.

Известен способ изготовления преобразователя солнечной энергии [1], включающий операции образования на поверхности полупроводниковой подложки структуры параллельно расположенных канавок путем механического удаления или травления, нанесения на всю структурированную поверхность пассивирующего слоя и срезания возвышенностей гребней на глубину пассивирующего слоя.

Такой способ изготовления солнечного элемента не позволяет создавать преобразователь солнечной энергии на основе полупроводниковых многослойных структур.

Используется также способ изготовления преобразователя солнечной энергии [2], с помощью которого полупроводниковый р-п-слой изготавливают путем измельчения полупроводникового материала в порошок, нагрева порошка и спекания до образования полупроводникового слоя. Этот способ изготовления преобразователя солнечной энергии сложен в реализации, трудоемок, энергозатратен. Он также не позволяет создавать преобразователь солнечной энергии на основе полупроводниковых многослойных структур.

Нами создана методика синтеза полупроводникового преобразователя оптического излучения, который обладает высокими коэффициентами преобразования оптической энергии в электрическую и выходной электрической мощностью.

Технология синтеза полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую реализуется по схеме, представленной на рисунке 1.

На середину заданного участка металлического основания с химически чистой поверхностью, являющегося нижним электродом преобразователя солнечной энергии, наносят методом ионно-плазменного распыления через маску узкий слой диэлектрика, например SiO_2 . Температура нагрева металлического основания составляет $300...400^\circ\text{C}$, а средняя скорость формирования диэлектрика $V = 30...40$ А/с. Молекулярно-лучевой эпитаксией наносят с помощью маски на левую отделенную слоем диэлектрика область основания сильнолегированный донорной примесью монокристаллический слой широкозонного полупроводника p^+ -типа проводимости, например GaAs, легированный Te с концентрацией $(1...5)10^{19} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

Молекулярно-лучевой эпитаксией масочным методом наносят на правую отделенную слоем диэлектрика область основания сильнолегированной акцепторной примесью монокристаллический слой широкозонного полупроводника p^+ -типа проводимости, например GaAs, легированный Cd с концентрацией $(1...5)10^{19} \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость наращивания p^+ -GaAs составляет $20...30$ А/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На сформированные p^+ -слой и p^+ -слой широкозонного полупроводника соответственно наносят через соответствующие маски эпитаксиальный n -слой широкозонного полупроводника (GaAs), легированного донорной примесью (Te) с концентрацией $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и p -слой того же полупроводника (GaAs), легированного акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На n -слой и p -слой левой и правой областей фоточувствительной структуры наносят слои обратной проводимости из того же широкозонного полупроводника (GaAs), то есть слои p - и n -типа проводимости, легированные акцепторной примесью (Cd) и донорной примесью (Te) с концентрацией $N_{D,A} = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$. В результате формируются два p - n -перехода фоточувствительной структуры, ширина обедненной области которых составляет $W_0 = 0,65$ мкм.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии через соответствующие маски формируют на p - и n -слоях широкозонного полупроводника варизонные слои более широкозонного полупроводника (AlAs) того же типа проводимости $\text{Am}_1\text{XAm}_{2(1-X)}\text{B}_n$, изменяя параметр x от 1 до 0 в варизонных слоях со стороны широкозонного полупроводника. Варизонные слои p - и n -типа проводимости наращивают с одновременным легированием акцепторной примесью (Cd) p -слоя с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и донорной примесью n -слоя (Te) с концентрацией $N_D = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

Наносят на p - и n -варизонные слои через соответствующие маски соответственно слой p -типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и слой n -типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированного донорной примесью с $N_D = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$, а толщина этих слоев составляет $0,4...0,6$ мкм.

На p - и n -слоях более широкозонного полупроводника формируют сильнолегированные слои более широкозонного полупроводника (AlAs): p^+ -типа слой, легированный акцепторной примесью Cd с концентрацией $N_A = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$, и p^+ -типа слой, легированный донорной примесью $N_D = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость формирования p^+ - и p^+ -слоев более широкозонного полупроводника составляет $20...30$ А/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На p^+ - и p^+ -слои более широкозонного полупроводника заданных размеров просветляющий слой SiO_2 толщиной $0,05...0,15$ мкм. Температура нагрева основания $T = 350...400^\circ\text{C}$.

Наносят на свободные от просветляющего слоя участки p^+ - и p^+ -слоев более широкозонного полупроводника электронно-лучевым напылением омических контактов путем последовательного нанесения на p -слой структуры $Cd-Al-Ni$ суммарной толщиной 1,5...2,0 мкм и на p^+ -слой структуры $Te-Al-Ni$ общей толщиной 1,5...2,0 мкм.

Завершающей операцией способа изготовления преобразователя солнечной энергии является термоотжиг сформированной структуры в инертной среде в течение 10... 15 мин при температуре 300...450 °С для создания надежных омических контактов к p^+ - и p^+ -слоям широкозонного полупроводника (GaAs) и полупроводника (AlAs).

Изготовленный предложенным способом полупроводниковый преобразователь солнечной энергии с фоточувствительной структурой на двух последовательно соединенных n - p - и p - p -структурах типа $nGaAs-pGaAs-pGa_xAl_{(1-x)}As-pAlAs$ и $pGaAs-nGaAs-nGa_xAl_{(1-x)}As-nAlAs$ размером рабочей поверхности первой и второй областей фоточувствительной структуры 5×10 мм

каждая позволяет получать при интенсивности солнечного излучения с энергией $P_v = 65$ мВт/см выходную электрическую мощность $P_{ат} = 40\text{--}50$ мВт/см², максимальное выходное напряжение $U_{ам} = 2,6$ В и максимальный выходной ток $I_{ам} < 20$ мА/см².

Технико-экономические преимущества полупроводникового преобразователя солнечной энергии, полученного предлагаемым способом, в сравнении известными способами-аналогами:

- более чем в 3 раз возрастает выходная мощность;
- более чем в 2 раза возрастает фотоЭДС.

Литература

1. Пат. 20122261 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Способ изготовления фотоэлектрического преобразователя / А. В. Иванов, Б. П. Сидоров. – № 20122259; опубл. 10.08.2021, Бюл. № 22.
2. Пат. 02148876 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Фотоэлектрический модуль и способ его изготовления / В. К. Петров, С. М. Козлов. – № 02148876; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12.

УДК 681.325

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СОЛНЕЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Способ изготовления термоэлектрического солнечного холодильника включает формирование термоэлектрического элемента, в котором на поверхность монокристаллической подложки из-за широкозонного полупроводника наносится первый p^+ -слой, который размещают на металлическом основании, на противоположной поверхности подложки формируют n -слой, на который последовательно наращивают эпитаксиальный i -слой и второй p^+ -слой, образца $p^+-i-n-p^+$ структуру из широкозонного полупроводника и наносит на второй p^+ -слой электропроводящий просветляющий оптически прозрачный слой.

Ключевые слова: термоэлектрический холодильник, монокристаллическая подложка, широкозонный полупроводник, металлическое основание, эпитаксиальный слой, омический контакт, просветляющий слой.

FORMATION OF A SEMICONDUCTOR SOLAR REFRIGERATOR Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The method for manufacturing a thermoelectric solar refrigerator includes forming a thermoelectric element in which a first p^+ layer is applied to the surface of a single-crystal substrate from a wide-bandgap semiconductor, which is placed on a metal base, an n -layer is formed on the opposite surface of the substrate, onto which an epitaxial i -layer and a second p^+ layer are successively grown, of a $p^+-i-n-p^+$ structure from a wide-bandgap semiconductor, and an electrically conductive, antireflective, optically transparent layer is applied to the second p^+ layer.

Keywords: thermoelectric refrigerator, single-crystal substrate, wide-bandgap semiconductor, metal base, epitaxial layer, ohmic contact, antireflection layer.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18
e-mail: bntu@bntu.by

Термоэлектрические холодильники – это новые типы полупроводниковых устройств, функционирующих на эффекте Пельтье и осуществляющих преобразование солнечной лучистой энергии в минусовые температуры на выходе.

Существует способ создания термоэлектрического солнечного холодильника [1], включающий операцию нанесения на подложку из анизотропного материала элементов – полупроводников n -типа и p -типа проводимости, на которых

формируют омические контакты. Такой способ изготовления термоэлектрического холодильника не позволяет создавать полупроводниковый солнечный холодильник на основе p - n переходов с высокой температурой охлаждения.

Также известный способ изготовления полупроводникового термоэлектрического холодильника [2], который включает операции нанесения на ленту из проводящей плоской матрицы омиче-

ских контактов к изолирующей пластине, нанесения на р-области р-п переходов, формирования омических контактов на торцевых сторонах п-областей переходов, прикрепления внешних выводов к омическим контактам.

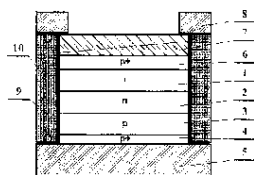


Рисунок 1 – Структура термоэлектрического солнечного холодильника

Изготовленные таким способом термоэлектрические холодильные структуры обладают: сложной технологией изготовления термоэлектрического холодильника, включая операции формирования омических контактов к р- и п-областям, изготовления ленты с проводящей пленкой, нанесения на эту пленку матрицы омических контактов, прикрепления контактов к изолирующей пластине и посадки р-п перехода на эти контакты причем, созданный этим способом термоэлектрический холодильник не может осуществлять прямое преобразование солнечной энергии в холод.

Нами создан способ получения термоэлектрического солнечного холодильника, позволяющего осуществить прямое преобразование солнечной энергии в холод, существенно увеличить рабочую температуру охлаждения полупроводникового термоэлектрического холодильника и повысить стабильность его работы.

Технология изготовления термоэлектрического солнечного холодильника отображается структурой, изображенной на рисунке 1.

На полупроводниковой монокристаллической области (подложке) р-типа проводимости из широкозонного полупроводника, например кремния, легированной бором с концентрацией $N_A = (10^{16}-10^{19}) \text{ см}^{-3}$, толщиной $0,1 + 0,3 \text{ мм}$ формируют методом термической диффузии слой п-типа проводимости, легированный донорной примесью с концентрацией примеси $N_d = (10^{16} - 10^{19}) \text{ см}^{-3}$, толщиной $0,6 + 1,2 \text{ мкм}$. Температура диффузии примеси составляет $1100 + 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, а время процесса диффузии – $0,6-0,8 \text{ часа}$.

На сформированный п-слой методом газовой эпитаксии наращивают эпитаксиальный слой кремния собственной проводимости толщиной $(0,7 + 0,9) \text{ мкм}$, поскольку диффузионная длина носителей заряда L_d в собственном полупроводнике выше, чем в примесном. Температура нагрева в зоне реакции $T = 600-700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Методом термической диффузии на эпитаксиальном слое широкозонного полупроводника, например кремния, формируют сильнолегированный p^+ -слой, легированный акцепторной примесью-бором с концентрацией примеси $N_A = (10^{16} - 10^{19}) \text{ см}^{-3}$, толщиной $0,3-0,5 \text{ мкм}$.

Температура процесса диффузии бора $T = 1000-1100 \text{ }^\circ\text{C}$, а время процесса составляет $0,3-0,5 \text{ часа}$.

Методом термической диффузии на поверхности кремниевой монокристаллической р-области формируют сильнолегированный слой p^+ -типа толщиной $0,3-0,5 \text{ мкм}$ введением акцепторной примеси – бора с концентрацией $(10^{20} - 10^{21}) \text{ см}^{-3}$. Температура процесса диффузии бора $T = 1000-1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

На сформированный p^+ -слой широкозонного полупроводника со стороны i-слоя наносят методом электронно-лучевого испарения или ионно-плазменного распыления проводящий слой из светопрозрачного материала, например из окиси олова или окиси индия, который является омическим контактом к p^+ -слою широкозонного полупроводника и просветляющим слоем. Температура процесса $T = 350-450 \text{ }^\circ\text{C}$.

С помощью электропроводящего клея, представляющего смесь эпоксидной смолы и алюминиевого или серебряного порошка, приклеивают сформированную $p^+-i-p-p^+$ структуру термоэлектрического солнечного холодильника к алюминиевому основанию по стандартной технологии. Затем путем приклеивания присоединяют внешние алюминиевые выводы к электропроводящему слою из светопрозрачного материала.

Методом микроконтактной или ультразвуковой сварки присоединяют металлическую проволоку к основанию и внешнему алюминиевому выводу термоэлектрического солнечного холодильника, обеспечивая короткое замыкание между его омическим выводом и основанием.

Завершающей операцией способа изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии является термоотжиг сформированной $p^+-i-p-p^+$ структуры в инертной среде в течение $10-15 \text{ минут}$ при температуре $300-400 \text{ }^\circ\text{C}$ для создания надежных омических контактов к p^+ -слоям широкозонного полупроводника (кремния).

Формирование термоэлектрического солнечного холодильника на монокристаллической кремниевой подложке со структурой термочувствительного элемента $p^+-i-p-p^+$ типа с омическими контактами в соответствии с изложенной методикой приведена на рисунке 1.

На кремниевой монокристаллической подложке р-типа проводимости с концентрацией акцепторной примеси-бора $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ориентированной в плоскости (111) и с совершенной поверхностью, размером $48 \times 48 \text{ мм}$, толщиной $0,2 \text{ мм}$ формируют методом термической диффузии п-слой 2 толщиной $0,9 \text{ микрона}$ путем введения донорной примеси-фосфора с концентрацией $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Температура процесса диффузии фосфора $T = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, время процесса $0,6 \text{ часа}$.

На сформированный п-слой 2 методом гидридной эпитаксии из газовой фазы наносят эпитаксиальный i-слой 3 кремния собственной проводимости толщиной $1,3 \text{ микрона}$. Температура процесса эпитаксиального наращивания i-слоя 3

$T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя скорость наращивания i -слоя 3 составляет 25 А/с .

Методом термической диффузии на эпитаксиальном i -слое 3 кремния формируют сильнолегированный p^+ -слой 4 путем введения акцепторной примеси-бора с концентрацией $N_A = 10^{19} - 10^{20}\text{ см}^{-3}$ толщиной $0,4\text{ микрона}$. Температура диффузии бора $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, время процесса легирования составляет $0,5\text{ часа}$.

Методом термической диффузии на поверхности кремниевой монокристаллической подложки 1 p -типа проводимости формируют сильнолегированный p^+ -слой 5 толщиной 2 мкм с концентрацией легирующей примеси-бора $N_A = 10^{19} - 10^{20}\text{ см}^{-3}$. Температура диффузии бора $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а время формирования p^+ -слоя 5 составляет $0,3\text{ часа}$.

На сформированный p^+ -слой 4 кремния методом ионно-плазменного распыления наносят проводящий слой 6 из светопрозрачного материала - окиси олова - толщиной 2 микрона , который является омическим контактом к p^+ -слою 4 и просветляющим слоем.

Размещают монокристаллическую кремниевую подложку 1 со сформированной $p^+ - i - n - p^+$ структурой на алюминиевом основании 7 размером $48 \times 48\text{ мм}$, толщиной 4 мм и жестко соединяют ее с алюминиевым основанием посредством электропроводящего клея. Алюминиевое основание 7 – это нижний вывод термоэлектрического солнечного холодильника.

Присоединяют к верхнему омическому контакту – электропроводящему слою 6 – верхний внешний вывод термоэлектрического солнечного

холодильника из алюминия шириной 3 мм и толщиной 1 мм по периметру электропроводящего слоя $6\text{ } 48 \times 48\text{ мм}$ посредством приклеивания его электропроводящим слоем состава: $70\text{ \%}$ алюминиевый порошок + $30\text{ \%}$ эпоксидного слоя.

Посредством ультразвуковой сварки по стандартной технологии присоединяют в четырех точках по периметру со сдвигом на 90° алюминиевые проволоочные выводы толщиной $0,3\text{ мм}$ к алюминиевому основанию 7 и внешнему алюминиевому выводу 8.

Производят термоотжиг изготовленного термоэлектрического солнечного холодильника с термочувствительным элементом $p^+ - i - n - p$ типа в инертной среде в течение 15 минут при температуре $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ для создания надежных омических контактов к p^+ -слоям кремния.

Изготовленный предложенным способом термоэлектрический солнечный холодильник размером $48 \times 48\text{ мм}$ при интенсивности солнечного излучения 70 мВт/см^2 позволяет получать предельную температуру охлаждения $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а расчетная надежность работы устройства составляет 10^5 часов . Он обеспечивает прямое преобразование солнечной энергии в холод.

Литература

1. Пат. 5022928 США Термоэлектрический охлаждающий модуль / R. J. Buist, P. G. Lau. – № 07/434,800; заявл. 07.11.1989; опубл. 11.06.1991.
2. Пат. 9339 Беларусь Термоэлектрический генератор / А. К. Петров, В. Л. Сидоренко. – № a20020015; заявл. 10.01.2002; опубл. 30.09.2003, Бюл. № 3.

СЕКЦИЯ 2. ФОТОНИКА, ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

UDC 621.3.038.825.2

SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF Nd:LaAl₂B₃O₉ CRYSTALGorbachenya K. N.^{1,2}, Polubok S. V.², Ardashev V. S.², Maltsev V. V.³,Koporulina E. V.³, Volkova E. A.³, Jiliaeva A. I.³, Afanasiev A. E.³, Naprasnikov D. A.³, Kisel V. E.¹¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²The National Children's Technopark, Minsk, Belarus³Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. Laser-related spectroscopic properties of Nd_x:La_{1-x}Al₂B₃O₉ (x = 0.03-0.06) crystals were determined. The room temperature absorption spectrum was measured in the spectral range of 400-1000 nm. Preliminary studies of the luminescence kinetics of this crystals demonstrate the absence of Nd³⁺ concentration quenching over the entire doping range investigated. This makes this material promising for the development of highly efficient laser gain media with a high concentration of active ions. Then, the LaAl₂B₃O₉ crystals doped with Nd ions looks promising as a gain medium for compact diode-pumped lasers operating in the IR spectral range.

Keywords: neodymium, borate crystals, spectroscopic properties.

Address for correspondence: Gorbachenya K. N., ave. Nesavisimosti, 65, Minsk, 220113, Belarus

e-mail: gorby@bntu.by

Anhydrous rare earth-aluminum borates are an important class of materials that have attracted considerable interest over the past three decades due to their potential use in laser technologies. To date, they can be divided into two families. The first of these is orthoborates RAl₃(BO₃)₄ (R = Pr–Lu), which crystallize in the rhombohedral R32 and/or monoclinic space groups C2 and C2/c, depending on the formation temperature and the type of rare earth cation. Lower-temperature dimetaborates with the general formula RAl₂B₃O₉ of the second family were obtained firstly as a side phase during the growth of orthoborates with large (R = Pr, Nd) cations, and for a long time were in the shadow of the first, more studied variety. Unlike orthoborates, rare earth dimetaborates belong to the hexagonal symmetry (sp. gr. $P\bar{6}2m$) with tetrahedral boron coordination [1–5]. The aim for our study was the search for new materials for optical applications and the creation of new active laser devices, which will significantly expand the functionality of solid-state lasers in the near-IR band with pumping by semiconductor laser diodes.

The unpolarized absorption spectrum at the room temperature was measured with a Varian CARY 5000 spectrophotometer. The spectral bandwidth was 0.4 nm. Lifetime measurements were performed using an optical parametric oscillator, pumped by the third harmonic of a Q-switched Nd:YAG laser. The fluorescence decay was registered by InGaAs photo-diode and a 500 MHz digital oscilloscope.

Luminescence decay curves were recorded experimentally for all studied crystals at the wavelength of near 1064 nm. They have exponential character, the luminescence lifetimes are presented in the Fig. 1. The luminescence kinetics studies of Nd_x:La_{1-x}Al₂B₃O₉ (x = 0.03-0.06) demonstrate the absence of concentration quenching of Nd³⁺ in the entire studied doping range. This makes this material promising for the creation of highly efficient laser active media with a high concentration of active ions.

Unpolarized absorption spectrum of the Nd_x:La_{1-x}Al₂B₃O₉ crystal is presented in Fig. 2. The

spectrum reveals typical absorption bands of trivalent Nd³⁺ ions. The band associated with ⁴I_{9/2} → ⁴F_{5/2} + ²H_{9/2} transition is suitable for diode-pumping of Nd-doped LaAl₂B₃O₉ crystal.

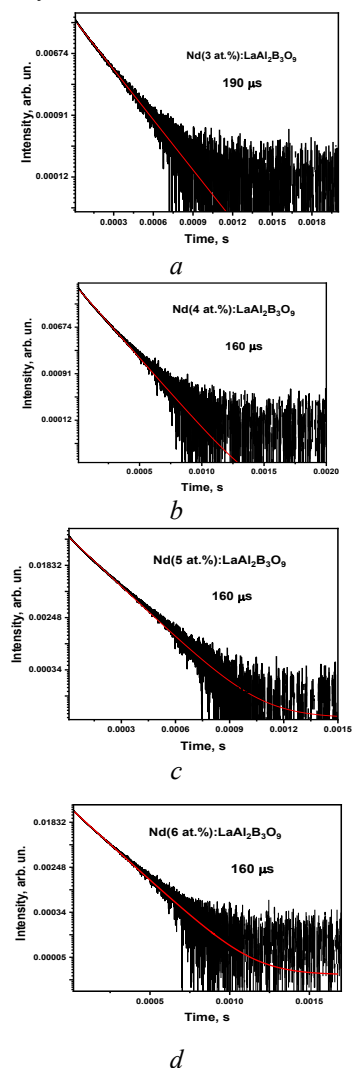


Figure 1 – Luminescence decay profiles

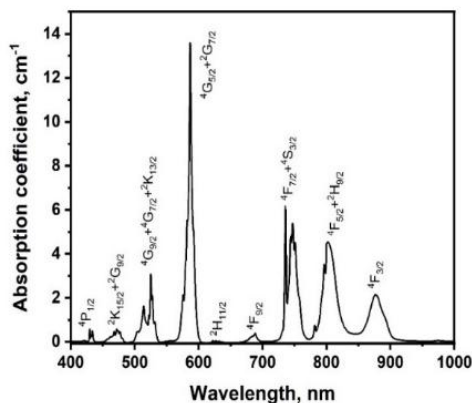


Figure 2 – Unpolarized absorption spectrum of Nd:LaAl₂B₃O₉ crystal

Thus, the Nd_x:La_{1-x}Al₂B₃O₉ crystal pumping can be performed by an AlGaAs laser diode at the wavelength of 808 nm, corresponding to the transition $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$. The ions excited by the pump radiation nonradiatively relax to the long-lived level $^4F_{3/2}$, which is the initial level for the main lasing transitions. In this case, it is possible to obtain lasing

on three transitions: $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ($\approx 0.9 \mu\text{m}$), $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ ($\approx 1.06 \mu\text{m}$), and $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ($\approx 1.3 \mu\text{m}$).

In conclusion, the Nd_x:La_{1-x}Al₂B₃O₉ crystals looks promising as a gain medium for compact diode-pumped lasers operating in the IR spectral range.

References

1. Новая серия двойных метаборатов / А. В. Пашкова [и др.] // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 258, № 1. – С. 103–106.
2. Кристаллическая структура нестехиометричного Nd, Al-диметабората NdAl_{2.07}(B₄O₁₀)O_{0.6} / Д. Ю. Пуцаровский, О. Г. Карпов, Н. И. Леонюк, Н. В. Белов // Доклады Академии наук СССР. – 1978. – Т. 241, № 1. – С. 91–94.
3. A new double-cell polytype of samarium aluminum dimetaborate: Synthesis, crystal structure, and spectroscopic characterization / A. M. Antipin [et al.] // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 31. – Art. 103317.
4. Pepsosite-(Ce), a new mineral from Campagnano (Italy): the first anhydrous rare-earth-element borate / G. Della Ventura, G. Parodi, A. Mottana, M. Chaussidon // European Journal of Mineralogy. – 1993. – Vol. 5. – P. 53–58.
5. REEAl_{2.07}(B₄O₁₀)O_{0.60} dimetaborates (REE = La, Pr): synthesis and X-ray structural characterization / F. Capitelli [et al.] // Zeitschrift für Kristallographie. – 2011. – Vol. 236. – P. 219–225.

УДК 681.722.25, 535.317

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЯМИ FREEFORM

Алешкевич К. В., Артюхина Н. К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены особенности проектирования и результаты расчета клиновидной призмы с поверхностями свободной формы.

Ключевые слова: поверхности freeform, клиновидная призма, полное внутреннее отражение, структурные ограничения.

DESIGNING A PRISM WITH FREEFORM SURFACES

Aleshkevich K. V., Artyukhina N. K.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the design features and calculation results of a wedge-shaped prism with freeform surfaces.

Keywords: freeform surfaces, Wedge-shaped prism, total internal reflection, structural constraints.

Адрес для переписки: Алешкевич К. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kari.alyshevich@gmail.com.

Совершенствование оптики компактных систем требует сохранения высокого качества изображения при уменьшении массогабаритных характеристик. Это приводит к усложнению оптических схем за счет применения элементов с асферической формой преломляющих поверхностей, а также дифракционных оптических элементов. Однако этого недостаточно, поэтому перспективным видится применение компоновки на основе клиновидных призм с оптическими поверхностями freeform (свободной формы) [1].

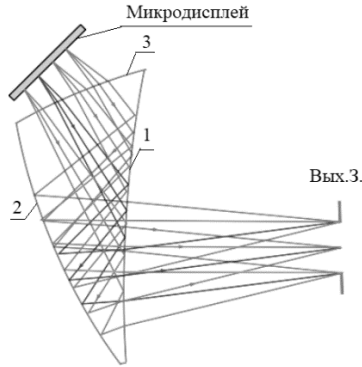
Цель работы – определить особенности проектирования призмы с поверхностями свободной формы, представленной на рисунке 1.

Ключевыми вопросами в ходе проектирования призмы с поверхностями freeform, согласно источнику [2], являются:

- представление поверхности свободной формы и выбор стратегии проектирования;
- ограничение полного внутреннего отражения (ПВО);
- структурные ограничения для формирования допустимой призмы-линзы.

Выбор подходящего метода для представления поверхности свободной формы очень важен. Различные методы представления не только по-разному влияют на скорость трассировки лучей и сходимость оптимизации, но и предлагают разные степени свободы проектирования.

Поэтому, принимая во внимание скорость трассировки и большое количество полей, было решено использовать следующую методику.



1 – поверхность свободной формы, работающая на ПВО; 2 – асферическая поверхность; 3 – преломляющая поверхность свободной формы
Рисунок 1 – Ход лучей в призме свободной формы

Система моделируется «наоборот» тому, как установка будет работать в реальности. В действительности (в физической системе) источником излучения является микродисплей, а плоскостью изображения – сетчатка человеческого глаза. Однако для точного моделирования этой настройки и эффективной оптимизации в OpticStudio система определена таким образом, что выходной зрачок физической системы является входным зрачком.

Во избежание преждевременного выхода луча из призмы, при ее моделировании, нужно начинать добавлять поверхности по одной и отслеживать ход главного луча под одним углом поля зрения через систему, при этом наклоняя грани призмы и указывая поверхности с отражением по необходимости.

В связи с тем, что поверхность 1 работает как с преломленными, так и с отраженными лучами (поверхность 1' на рисунке 2), на нее не наносится отражающее покрытие, а отражение происходит за счет ПВО.

Поэтому ограничение на угол падения верхнего краевого луча R_{1b} на поверхность 1' можно записать:

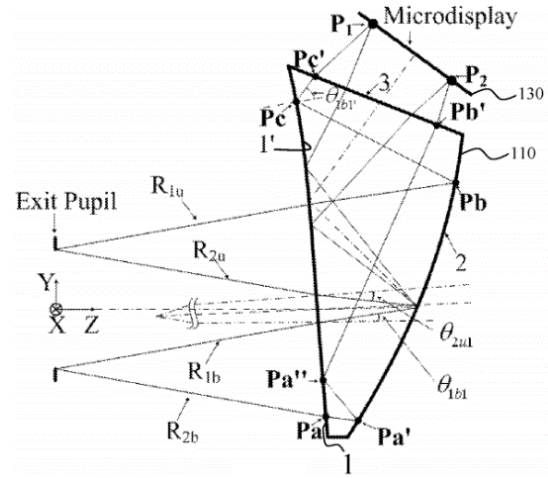
$$\theta_{1b1'} > \arcsin \frac{n_r}{n_i}, \quad (1)$$

где n_r – показатель преломления материала, в котором будет происходить преломление, n_i – показатель преломления среды, в которой распространяется свет.

Для избегания ПВО на поверхности 1 применяется система уравнений (2):

$$\begin{cases} \theta_{1b1} < \arcsin \frac{n_r}{n_i}, \theta_1 \leq 0, \\ \theta_{2u1} < \arcsin \frac{n_r}{n_i}, \theta_1 \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где θ_{1b1} – угол падения нижнего краевого луча R_{1b} на поверхность 1; θ_{2u1} – угол падения верхнего краевого луча R_{2u} на поверхность 1; θ_1 – угол наклона поверхности 1 вокруг оси X.



1 – поверхности свободной формы, работающая на ПВО; 1' – поверхность, имитирующая поверхность 1; 2 – асферическая поверхность; 3 – преломляющая поверхность свободной формы
Рисунок 2 – Ограничение ПВО в призме-линзе

Проектирование клиновидной призмы с поверхностями свободной формы требует оптимизации не только по ПВО, но и форм отдельных поверхностей для минимизации ошибок волнового фронта при ограничениях угла падения луча, установленных выражениями (1) и (2). Кроме того, необходимо ввести дополнительные структурные ограничения для того, чтобы гарантировать, что три поверхности вместе образуют правильную форму призмы-линзы, что все лучи через поля могут быть прослежены без помех или преждевременного выхода из поверхности, и что призма-линза сохранил желаемую толщину центра и края. Принимая это во внимание можно записать ограничения для оптимизации призмы:

$$\begin{cases} Y_{Pa'} - Y_{Pa} < 0 \\ Y_{Pa''} - Y_{Pa} > 0 \\ 1 < Z_{Pa'} - Z_{Pa} < 7 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{Pb'} - Y_{Pb} > 0 \\ -5 < Z_{Pb'} - Z_{Pb} < -1' \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} -4 < Y_{Pc} - Y_{Pc'} \leq 0 \\ -1 < Z_{Pc} - Z_{Pc'} < 0' \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Z_{Pa} \geq \text{вынос зрачка} \\ Z_{Pc} \geq \text{вынос зрачка} \end{cases}, \quad (6)$$

где все координаты Y, Z в уравнениях относятся к глобальной системе координат с началом, расположенным в центре выходного зрачка.

Эффективность приведенных рекомендаций продемонстрирована результатами расчета компактного окуляра призматического типа, представленного на рисунке 3.

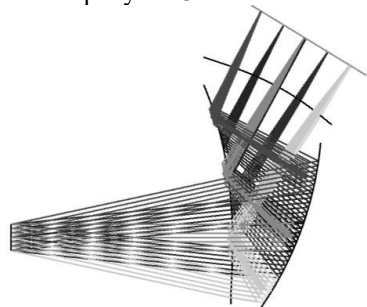


Рисунок 3 – Призма-линза после окончательной оптимизации

Данная система работает в спектральном диапазоне (480–656,3) нм и имеет фокусное расстояние $f' = 22,2$ мм, входной зрачок $D = 4$ мм, угловое поле зрения по вертикали $2\omega_v = 24,2^\circ$, по

горизонтали $2\omega_h = 31,6^\circ$, по диагонали $2\omega_d = 39,5^\circ$, вынос зрачка 27 мм. Разрешающая способность в центре поля составляет $1''$. При этом габариты системы не превышают $(38,5 \times 18,6 \times 31)$ мм.

В ходе работы были проанализированы данные по призме с поверхностями freeform, получены аналитические выражения для структурных ограничений и ПВО при оптимизации схемы. Для подтверждения работы представленных формул, по описанной методике была спроектирована призма-линза с поверхностями свободной формы.

Литература

1. Грейсух, Г. И. Компактный объектив перископического типа на основе клиновидных призм с поверхностями свободной формы // Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, И. А. Левин, С. В. Казин // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 10. – С. 3–10.

2. Optical see-through free-form head-mounted display: пат. US 11300790 B2 / D. Cheng [et al.]; заявл. 12.01.2022; опубл. 12.04.2022. – 15 с.

УДК 623.467

РАЗВИТИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Али-заде Э. Т., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены различные типы управления беспилотными летательными аппаратами, а также способы взаимодействия оператора с летательным аппаратом и недостатки каждого метода связи. Изложен принцип работы беспроводной оптической системы связи. Предложен вариант дальнейшего развития приемо-передающих систем управления по лазерному лучу.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, связь между пилотом и аппаратом, лазерный канал управления.

DEVELOPMENT OF RECEIVING AND TRANSMITTING AIRCRAFT CONTROL SYSTEMS

Ali-zade E. T., Kuznechik V. O.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers various types of control of unmanned aerial vehicles, as well as ways for the operator to interact with the aircraft and the disadvantages of each communication method. The principle of operation of a wireless optical communication system is described. A variant of further development of laser beam receiving and transmitting control systems is proposed.

Keywords: unmanned aerial vehicle, communication between the pilot and the vehicle, laser control channel.

Адрес для переписки: Али-заде Э. Т. пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alizade.eldar843@gmail.com

Согласно определению, одобренному ИКАО, беспилотный летательный аппарат (дрон) представляет собой воздушное судно без пилота, которое выполняет полет без командира воздушного судна на борту и либо полностью дистанционно управляется из другого места с земли, с борта другого воздушного судна, из космоса, либо запрограммированно и полностью автономно [1].

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) делятся на гражданские, коммерческие и военные. Они применяются для решения различных задач: сельское хозяйство, строительство, энергетика, археология, картографирование, тушение пожаров, поисково-спасательные операции, медицина,

мониторинг трубопроводов, мостов, линий электропередач, охраняемых объектов и другие.

Первый дистанционно управляемый БПЛА военного назначения многократного использования появился в 1933 году, гражданские дроны – в 2000-х годах.

На данный момент управление беспилотными аппаратами осуществляется тремя типами: дистанционный, автономный и гибридный.

Дистанционное управление полетом – это работа специалиста с пультом. Аппарат получает команды, а также передает информацию пилоту в реальном времени.

Аппараты с автономной системой управления запрограммированы на выполнение определенной задачи. Работают автоматически за счет встроенного микропроцессора, возможно применение искусственного интеллекта (ИИ-алгоритмов). Беспилотники могут самостоятельно действовать при наличии встроенного навигационного оборудования.

Гибридная система управления дроном – оператор с пультом и функция автономности. Совмещенный набор средств позволяет минимизировать повреждения аппарата и успешно выполнить задачу в случае потери связи с оператором. Обычно гибридная система управления имеется у аппаратов с большой дальностью действия.

Связь между пилотом и аппаратом обеспечивается передачей данных через радиоканал, 5G-канал, проводная или оптоволоконная линия связи, также возможно обеспечение управления при помощи беспроводной оптической линии связи.

Радиоканал и 5G-канал подвержены влиянию РЭБ систем что делает их использование не целесообразным при определенных условиях.

Проводная или оптоволоконная линия связи не подвержены влиянию РЭБ систем, однако имеют ограничение по дальности работы за счет длины кабеля. Проводная линия связи имеет меньшее быстродействие в сравнении с оптоволоконной линией связи.

Беспроводные оптические системы имеют следующие недостатки: малая маневренность летательного аппарата за счет прямолинейного движения по лучу лазера, до цели должна быть прямая видимость.

Передача данных в беспроводных оптических системах основана на организации высокоскоростных каналов связи посредством инфракрасного излучения, которые позволяют обеспечить передачу данных между объектами через атмосферу, передавая модулированное излучение без использования стекловолна. Излучателем служит мощный полупроводниковый лазерный диод. Входной электрический сигнал поступает в приемопередающий модуль, в котором кодируется различными помехоустойчивыми кодами, модулируется оптическим лазерным излучателем и фокусируется оптической системой передатчика в узкий коллимированный лазерный луч. Оптическая система фокусирует сигнал на фотодиод, которая преобразует излучение в электрический сигнал, далее сигнал демодулируется и преобразуется в сигнал выходного интерфейса. Оптические системы работают в диапазоне длин волн 700–950 нм.

На принимающей стороне оптическая система фокусирует оптический сигнал на высокочувствительный фотодиод (или лавинный диод), который преобразует оптический пучок в электрический сигнал. При этом чем выше частота, тем больше объем передаваемой информации. Далее

сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса. Длина волны в большинстве реализованных систем варьируется в пределах 700–950 нм или 1550 нм, в зависимости от применяемого лазерного диода. При движении летательного аппарата располагается в лазерном поле, которое сохраняет свой размер по мере перемещения летательного аппарата. В ходе полета летательного аппарата лазерное поле сопровождает его на рабочих дальностях с помощью встроенной в прибор управления ZOOM-системы, обеспечивающей постоянный размер лазерного поля управления на протяжении полета ракеты. При этом задачей наводчика является совмещение прицельной марки прибора управления с изображением цели.



Рисунок 1 – Внешний вид передающих каналов

Развитие таких систем в основном состоит с развитием составных частей таких систем.

Направления развития приемопередающих систем управления по лазерному лучу:

- Совершенствование лазерных передающих устройств и на их основе модулирующих устройств (лазерные полупроводниковые диоды, диодные линейки, различные виды и реализации оптической модуляции и т. д.).

- Совершенствование фотоприемных устройств (фотодиодных модулей, фотодиодов) и модулей обработки аналогового сигнала.

- Совершенствование алгоритмов обработки цифрового сигнала (кодировка передаваемой информации).

- Совершенствование аналоговой и цифровой схемотехники.

На рисунке 1 показаны два различных передающих канала с разными техническими характеристиками. Они имеют различные по принципу излучательные системы, способы кодировки (защиты информации).

Разработка и развитие приемопередающих систем имеет большое значение, так как на базе таких систем можно создать приборы управления огнем по лазерному лучу или использовать их для управления дронами, когда передача информации через радиоканалы невозможна.

Литература

1. Беспилотный летательный аппарат (дрон, БПЛА) // Tadviser: [сайт]. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_\(дрон,_БПЛА\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_(дрон,_БПЛА)) (дата обращения: 20.12.2024).

2. Ловцов, Д. А. Моделирование оптико-электронных систем дистанционно пилотируемых аппаратов: монография / Д. А. Ловцов, Д. А. Гаврилов. – М.: Технолож-3000, 2019. – 164 с.

УДК 004.93'11

**МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ**
Беляев Ю. В., Литвинович Г. С., Мартинов А. О., Старовойт А. И., Цикман И. М.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ»,
Минск, Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика тематической обработки данных дистанционного зондирования для идентификации природных объектов по их коэффициенту спектральной яркости (КСЯ). Методика основана на анализе эталонных спектров, полученных в ходе лабораторных и наземных спектрометрических измерений образцов почв и хвои различного состояния. Созданная на их основе обучающая выборка использовалась для классификации авиационных данных. Показана эффективность предложенного подхода для выделения кластеров, соответствующих разной степени усыхания хвойных пород.
Ключевые слова: КСЯ, спектрометр, методика, классификация.

**RECOGNITION METHOD FOR NATURAL OBJECTS BASED
ON MULTILEVEL SPECTRAL DATA**

Belyaev Yu. V., Litvinovich H. S., Martinov A. O., Starovoit A. I., Tsykman I. M.

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents a method for thematic processing of remote sensing data for identifying natural objects by their spectral reflectivity. The method is based on the analysis of reference spectra obtained during laboratory and ground-based spectrometric measurements of soil samples and needles of various states. The training sample created on their basis was used to classify aviation data. The efficiency of the proposed approach for identifying clusters corresponding to different degrees of drying of coniferous species is shown.

Keywords: Reflectivity, spectrometer, methodology, classification.

*Адрес для переписки: Беляев Ю. В., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: belyu@tut.by*

Введение. Исследования спектральных характеристик природных объектов показали, что спектры отражательной способности существенно зависят от состояния и свойств объектов. Растительность и почвы имеют различные отражательные свойства в зависимости от влажности, фазы вегетации, поражения болезнями и других факторов. Эти отличия лежат в основе дистанционного зондирования Земли – по спектральным признакам можно идентифицировать тип поверхности и оценивать ее состояние. Целью настоящей работы является разработка методики тематической обработки данных для выделения и распознавания природных объектов по спектральным признакам на основе результатов лабораторных и наземных измерений.

Лабораторные измерения. Для верификации данных дистанционного зондирования проведены лабораторные спектрометрические измерения с использованием специализированного гониометрического комплекса «Визир» [1,2]. Комплекс «Визир» позволяет измерять двунаправленные спектрополяризационные коэффициенты отражения образцов в спектральном диапазоне 400–

2500 нм. В комплекс введен механизм автоматической смены образца и эталона: каждый спектрометр поочередно измеряет сигнал от исследуемого образца и от эталонной белой пластины (молочное стекло МС-20).

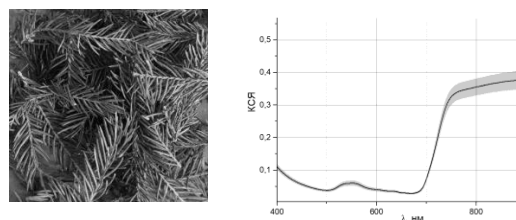


Рисунок 1 – Внешний вид образца хвои (слева) и измеренный КСЯ с дисперсией (справа)

В лабораторных условиях исследованы образцы различных почв и хвои в разной степени поражения (здоровые и больные образцы, классифицированные лесопатологом по степени усыхания), отобранные в полевых условиях, с целью получить их эталонные спектры для последующей классификации (рисунок 1). Такой подход обеспечивает сопоставимость лабораторных данных

с наземными измерениями, что важно для последующей валидации и интерпретации результатов.

Наземные измерения. Полевые эксперименты проведены на тестовых участках (Старобинский и Борисовский лесхозы) с целью сбора тестовых данных. Наземное спектрометрирование включало измерение спектральных отражательных характеристик различных природных поверхностей (почва, травяной покров.), а также параллельную регистрацию параметров атмосферы на момент измерений. Это позволило пересчитать зарегистрированные сигналы в абсолютные спектрально-энергетические единицы с учетом проведенной радиометрической калибровки прибора и вычислить коэффициент спектральной яркости объекта (КСЯ) (рисунок 2).

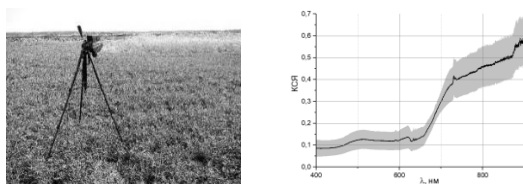


Рисунок 2 – Внешний вид полигона (слева) и измеренный КСЯ с дисперсией (справа)

Для съемки использовался переносной спектрорадиометр ФСР-05, которым регистрировались спектры отражения солнечного излучения от тестовых поверхностей с обязательным измерением яркости эталонного отражателя (молочное стекло МС-20).

Методика обработки и классификации. Спектральная отражательная способность почвы является эффективным средством диагностики ее типа и состояния. По характеру спектральных кривых можно выделять классы почвенного покрова, что используется при почвенном картографировании. Также учитываются различия спектров на участках с разным уровнем удобрения почвы, что может проявляться в изменении интенсивности отражения в отдельных диапазонах.

Каждый исследуемый полигон отличается особенностями местности: влажность, освещенность, состав растительности, биохимические характеристики почв и т. в. Все это приводит к необходимости дополнительной настройки классификаторов для конкретного региона. Поэтому наземные и лабораторные данные легли в основу обучающей выборки для классификатора данных большего масштаба: авиационных и космических.

Классификатор данных включает в себя несколько модулей: модуль нормализации данных (для исключения разной освещенности образцов), модуль классификации (включает в себя метод главных компонент, метод линейного дискриминантного анализа и метод Random Forest), а также модуль отображения и визуализации данных.

Для устранения различий в абсолютных значениях спектральной выборки выполняется нормализация средним (Z-нормализация) спектром. Для этого из каждого спектра вычитается выборочное среднее этого спектра и результат делится на среднеквадратическое отклонение.

На рисунке 3 представлено распределение измеренных авиационных спектров в осях главных компонент после применения алгоритма классификации, обученного на наземных и авиационных данных.

Круги малого размера (рисунок 3) отвечают за автоматическую классификацию, а круги большого размера – за наземную и лабораторную, то есть по сути являются эталонными.

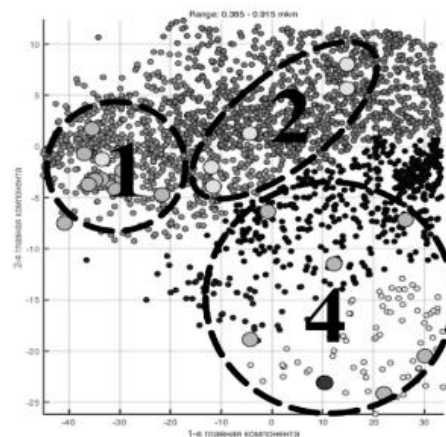


Рисунок 3 – Выделенные алгоритмом классификации кластеры различных категорий усыхания (обозначены цифрами) среди измеренных спектров на основе референсных, определенных по наземным измерениям

Спектры 4-й категории здоровья (обведены пунктиром) четко отделены от спектров 1-й и 2-й категорий (также отмечены пунктиром). 3-я категория здоровья была отнесена к 4-ой в виду сложной визуальной классификации специалистом-лесопатологом. Однако несколько «больных» образцов были распознаны классификатором как «здоровые», что, вероятно, было вызвано ошибочной классификацией лесопатолога, либо при измерении спектрометр захватил посторонние объекты вместе с кронами елей.

Заключение. Разработанная методика позволяет успешно классифицировать природные объекты, в частности выделять степени усыхания хвои, по данным дистанционного зондирования. Основой послужили эталонные спектры, полученные лабораторными и наземными измерениями. Большинство образцов корректно распознано, однако выявлены отдельные ошибки классификации, вероятно, связанные с неточностями экспертной оценки или помехами при измерениях.

Литература

1. Сизиков, А. С. Создание отечественного комплекса «Визир» для измерений двунаправленных спек-

трополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов / А. С. Сизиков, Ю. В. Беляев, И. М. Цикман // Безопасность и пожарная техника. – 2018. – № 2. – С. 28–37.

2. Модернизация комплекса «Визир» = Upgrading of the «Vizir» instrument / И. М. Цикман [и др.] // Приборостроение-2022: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 417–419.

УДК 681.525

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Бушук С. Б., Назаренко П. Н., Пекаревич В. В., Тавтын Р. А.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. Разработана схема и проведено экспериментальное моделирование автоматической высокоскоростной прецизионной системы автокоррекции оси лазерного пучка, фокусируемого на поверхность объекта, который хаотически движется вдоль определенной траектории. Управление угловым положением оси лазерного пучка осуществляется быстрым рулевым зеркалом (FSM зеркалом) по командам двухкоординатного позиционно-чувствительного детектора (PSD). PSD преобразовывает линейные координаты центра тяжести изображения цели на поверхности фотоприемной площадки в сигналы управления, которые подаются на вход контроллера пьезоэлектрического привода FSM зеркала. Контроллер обеспечивает высокоскоростное управление как напряжением, так и зарядом на пьезоэлектрическом приводе. Показано, что данная система управления обладает преимуществами систем автоматического управления как открытого, так и закрытого типа: малым временем отклика и низкой погрешностью управления угловым положением луча.

Ключевые слова: угловые координаты, FSM, PSD, гистерезис, время отклика.

HIGH-SPEED AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR ANGULAR POSITION OF LASER BEAMS

Bushuk S. B., Nazarenko P. N., Pekarevich V. V., Tavtyn R. A.

State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology",
Minsk, Belarus

Abstract. A design was developed and experimental modeling was conducted for an automatic, high-speed, precision system for autocorrecting the axis of a laser beam focused on the surface of an object chaotically moving along a defined trajectory. The angular position of the laser beam axis is controlled by an FSM mirror based on commands from a two-coordinate position-sensitive detector (PSD). The PSD converts the linear coordinates of the target image's center of gravity on the surface of the photoreceiving pad into control signals, which are fed to the input of the FSM mirror's piezoelectric drive controller. The controller provides high-speed control of both the voltage and charge on the piezoelectric drive. This control system is shown to possess the advantages of both open-loop and closed-loop automatic control systems: a fast response time and low beam angular position control error.

Keywords: angular coordinates, FSM, PSD, hysteresis, response.

Адрес для переписки: Назаренко П. Н., пр. Независимости, 68-1, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: nprn05@mail.ru

Целью настоящей работы являлось исследование возможностей создания системы автоматической коррекции положения лазерного пучка на поверхности мобильного объекта, обеспечивающей минимизацию временного отклика и гистерезиса привода FSM зеркала.

Система точного позиционирования лазерного излучения на объекте (Система) представляет собой систему автоматического управления лазерным лучом с открытым контуром и автоматической коррекцией гистерезиса пьезоэлектрического привода.

Функциональная структурная схема Системы приведена на рисунке 1. В состав Системы входят: приемный канал и угловой корректор оси пучка излучения лазера 9. Телескоп 8 формирует пятно лазерного излучения заданного размера на цели 1.



1 – цель; 2 – приемный объектив; 3 – модуль PSD приемника; 4 – корректирующий усилитель; 5 – гибридный усилитель; 6 – привод FSM зеркала; 7 – зеркало; 8 – телескоп Мерсена; 9 – лазер

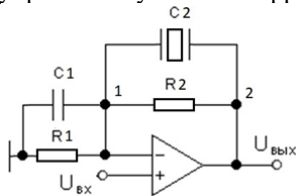
Рисунок 1 – Функциональная структурная схема

Приемный канал предназначен для формирования команд автоматического управления осью излучения лазера 9. Выполняет функцию измерения координат пятна на цели и преобразования их в электрические сигналы управления, подаваемые на вход углового корректора.

Излучение от цели 1 поступает в объектив 2, который формирует изображение цели на приемной площадке модуля двухкоординатного позиционно чувствительного детектора (PSD приемника) 3. Объектив 2 преобразует угловые координаты цели в линейные координаты (X , Y) на поверхности PSD приемников.

Модуль 3 преобразует линейные координаты изображения цели (X , Y) в электрические сигналы (напряжения) (V_X , V_Y), соответствующие линейным координатам центра тяжести изображения цели.

Двухканальный усилитель 4 с коэффициентом масштабирования K предназначен для согласования выходных сигналов модуля 3 с требованиями к сигналам управления углового корректора.



$C1$, $R1$ – опорные конденсатор и резистор;
 $C2$ – емкость пьезопривода; $R2$ – резистор нагрузки;
 $U_{вх}$, $U_{вых}$ – напряжения сигнала на входе и выходе операционного усилителя

Рисунок 2 – Схема гибридного усилителя

Угловой корректор предназначен для формирования команд автоматического управления осью излучения лазера 9. В состав углового корректора входят двухканальный аналоговый гибридный усилитель 5 и модуль быстрого рулевого зеркала (FSM зеркала), состоящий из пьезоэлектрического привода 6 и зеркала 7.

Усилитель 5 осуществляет «гибридное» управление пьезоэлектрическим приводом с автоматической минимизацией гистерезиса до уровня 0,2 % по методу [1]. Данный метод включает управление напряжениями (V_X^* , V_Y^*) и управление зарядами (Q_X^* , Q_Y^*) [1] на приводе FSM зеркала. Усилитель выполнен на основе неинвертирующего аналогового усилителя, в цепь обратной связи которого включен пьезопривод ($C2$) с параллельной нагрузкой ($R2$) в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2

При выполнении условия $R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2$ коэффициент усиления практически не зависит от

частоты входного сигнала во всей полосе рабочих частот операционного усилителя. Осциллограмма временного отклика на ступенчатый входной сигнал приведена на рисунке 3.

Переключение между управлением зарядом и управлением напряжением происходит автоматически в соответствии с характером напряжений ($K_X V_X$, $K_Y V_Y$), подаваемых на вход усилителя 5.

Привод FSM зеркала 6 осуществляет управление угловым отклонением θ^* механической оси зеркала 7 по угловым координатам (θ_X^* , θ_Y^*).

Зеркало 7 преобразовывает угловое отклонение своей механической оси в угловое отклонение $2\theta^*$ оптической оси пучка излучения лазера 9 по угловым координатам ($2\theta_X^*$, $2\theta_Y^*$).

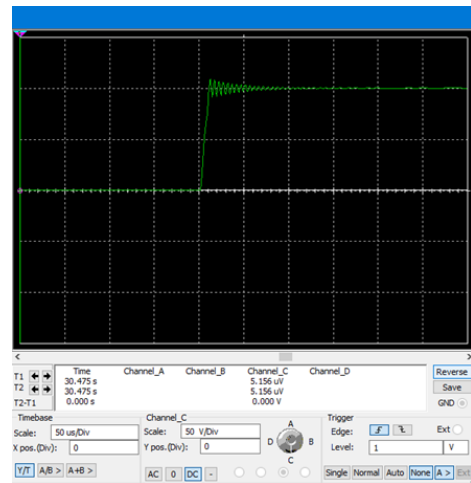


Рисунок 3 – Осциллограмма: временной отклик пьезопривода

Телескоп 8 формирует угловые характеристики лазерного луча, обеспечивающие требуемые размеры лазерного пятна на цели 1, и преобразовывает угловое отклонение оси лазерного пучка.

Проведены эксперименты по моделированию системы управления, структурная схема которой рассмотрена выше.

Экспериментально определены статические и динамические характеристики системы управления. Измеренные значения времени отклика и гистерезиса системы управления не превышали 0,7...1,0 мс и 1,0 %, соответственно.

Литература

1. Device for controlling a piezoelectric actuator: пат. US 2018/0183357 A1 / I. Quattara, J. L. Gach, P. Amram; заявл. 28.06.2018; опубл. 28.06.2018. – 9 с.

УДК 681.7

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Белохвостик Е. В.¹, Жук М. А.², Кузнецик В. О.¹¹Белорусский национальный технический университет²УП «НТЦ «ЛЭМТ»

Минск, Беларусь

Аннотация. Описаны, используемые в настоящее время, методы оценки энергетических и функциональных параметров приборов ночного видения.

Ключевые слова: прибор ночного видения, электронно-оптический преобразователь, принцип действия, эффективность.

EVALUATION OF ENERGY AND FUNCTIONAL PARAMETERS OF NIGHT VISION DEVICES

Belokhvostik E. V.¹, Zhuk M. A.², Kuznechik V. O.¹¹Belarusian National Technical University²UE «STC «LEMT»

Minsk, Belarus

Abstract. The methods currently used for assessing the energy and functional parameters of night vision devices are described.

Keywords: night vision device, image intensifier tube, operating principle, efficiency.

Адрес для переписки: Белохвостик Е. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: belokhvostikk7@gmail.com.

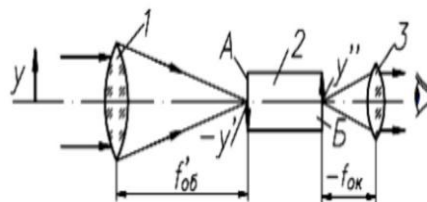
Приборы ночного видения (ПНВ) представляют собой сложные оптоэлектронные системы, предназначенные для визуализации объектов в условиях низкой освещенности.

ПНВ делятся по виду представления сигнала на аналоговые и цифровые, по принципу работы на активные и пассивные, по конструкции – на монокуляры, бинокуляры и псевдобинокуляры, очки, по назначению – приборы наблюдения и прицелы [1].

Современные ПНВ используют электронно-оптические преобразователи (ЭОП), тепловизионные сенсоры и цифровые алгоритмы обработки изображений. Эффективность ПНВ определяется совокупностью энергетических, оптических и сигнально-шумовых характеристик, которые подлежат количественной оценке [2].

Функционирование ПНВ основано на преобразовании фотонного потока, отраженного от наблюдаемого объекта, в электронный сигнал с последующим усилением и визуализацией. Ключевым элементом является ЭОП, работающий по принципу фотоэлектрического эффекта с последующим лавинным усилением и люминесцентной реконструкцией изображения. Идущие от объекта y ИК-лучи попадают в объектив 1 ЭОП на рисунке 1 и создают невидимое изображение y' в ИК области спектра на фотокатоде A ЭОП 2, которое затем преобразуется с помощью ЭОП в видимое y'' на экране B , т.е. оптическое изображение с одним спектральным составом преобразуется в оптическое изображение с другим спектральным составом (с переходом через промежуточное электронное изображение), которое рассматривают через окуляр 3 прибора.

ЭОП одновременно выполняет роль оборачивающей системы, поэтому его линейное увеличение $\beta_{\text{ЭОП}}$ является величиной отрицательной и обычно $\beta_{\text{ЭОП}} = 1^x$.



1 – объектив, 2 – ЭОП, 3 – окуляр, A – фотокатод, B – экран, y – размер объекта, y' – размер изображения объекта на фотокатоде ЭОП, y'' – размер изображения объекта на экране ЭОП

Рисунок 1 – Схема ПНВ

Видимое увеличение Γ всей оптико-электронной системы ПНВ определяется из соотношения

$$\Gamma = \frac{f'_{\text{об}}}{f'_{\text{ок}}} \beta_{\text{ЭОП}}. \quad (1)$$

Так как $\beta_{\text{ЭОП}}$ – величина отрицательная, то ПНВ формирует прямое изображение.

Эффективность ПНВ определяется рядом технических характеристик, среди которых ключевыми являются: разрешающая способность, отношение сигнал/шум и коэффициент совершенства. Каждый из этих параметров оказывает прямое влияние на качество визуализации, дальность обнаружения объектов и устойчивость прибора к фоновым помехам. Для комплексной оценки ПНВ необходимо рассмотреть указанные характеристики более подробно, начиная с разрешающей способности как базового критерия пространственной избирательности прибора.

Разрешающая способность измеряется числом штрихов, видимых раздельно на 1 мм длины фотокатода. В центре поля зрения ЭОП разрешающая способность достигает 50 линий на 1 мм и несколько снижается к краям поля [3].

Разрешающая способность объектива совместно с ЭОП рассчитывается по формуле:

$$A' = \frac{R_{\text{ЭОП}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{ЭОП}}$ – разрешающая способность фотокатода ЭОП, $f'_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива прибора, $f'_{\text{кол}}$ – фокусное расстояние коллиматора.

Разрешающая способность ЭОП 3 поколения составляет 60–68 штр/мм (для расчета использовали 68 штр/мм, однако с учетом снижения разрешающей способности на оптику в приборе она составляет 60 штр/мм).

Разрешающая способность ЭОП 2 поколения составляет 35–57 штр/мм (для расчета использовали 57 штр/мм, однако с учетом снижения разрешающей способности на оптику в приборе она составляет 49 штр/мм).

Фокусное расстояние объектива прибора $f'_{\text{об}} = 25,4$ мм.

Расчет разрешающей способности монокуляра при использовании ЭОП 3го поколения

$$\alpha' = \frac{R_{\text{ЭОП}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} = \frac{60 \cdot 25,4}{560} = 2,72'.$$

Расчет разрешающей способности монокуляра при использовании ЭОП 2го поколения:

$$\alpha' = \frac{R_{\text{ЭОП}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} = \frac{49 \cdot 25,4}{560} = 2,22'.$$

Отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) отражает способность прибора выделять полезный оптический сигнал от объекта на фоне различных шумов, возникающих в процессе преобразования, усиления и визуализации.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шум}}}. \quad (3)$$

Для ЭОП 2го поколения: $\text{SNR} = \frac{2,0}{0,12} = 16,7$.

Для ЭОП 3го поколения: $\text{SNR} = \frac{2,5}{0,08} = 31,25$.

Коэффициент совершенства (Figure of Merit, FOM) – это интегральный параметр,

позволяющий количественно оценить эффективность ЭОП. Он объединяет разрешающую способность и SNR:

$$\text{FOM} = R \cdot \text{SNR}. \quad (4)$$

FOM отражает способность прибора формировать четкое изображение при слабом освещении и наличии шумов.

Для ЭОП 2го поколения: $\text{FOM} = 49 \cdot 16,7 \approx 818$.

Для ЭОП 3го поколения: $\text{FOM} = 60 \cdot 31,25 \approx 1875$.

ЭОП II поколения обеспечивают умеренное качество изображения, пригодное для наблюдения при слабом лунном или звездном освещении. Однако при освещенности ниже 0,01 лк наблюдается рост шумов и снижение детализации.

ЭОП III поколения демонстрируют высокую чувствительность, низкий уровень шумов и отличную детализацию изображения. Приборы с таким FOM способны работать в условиях полной темноты (освещенность менее 0,001 лк) и обеспечивают уверенное распознавание объектов на расстоянии до 500 м.

Параметры разрешающей способности, SNR и FOM являются фундаментальными для оценки качества ПНВ. Их совместный анализ позволяет объективно сравнивать приборы разных поколений, прогнозировать их поведение в реальных условиях и выбирать оптимальные решения для конкретных задач. Повышение FOM – ключ к созданию более надежных, чувствительных и точных приборов ночного видения будущего.

Литература

1. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю. К. Грузевич. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 276 с.
2. Ришар, Ж. Характеристики систем ночного видения / Ж. Ришар. – М.: Мир, 1991. – 295 с.
3. Берковский, А. Г. Вакуумные фотоэлектронные приборы / А. Г. Берковский, В. А. Гаванин, И. Н. Зайдель. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

УДК 535.211; 621.315.592

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В Ge/Si ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Гацкевич Е. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено моделирование термостимулированной диффузии в GeSi гетероструктурах с квантовыми точками в условиях воздействия импульсами лазеров наносекундной длительности. Определены режимы частичного и полного растворения квантовых точек.

Ключевые слова: диффузия, гетероструктуры, квантовые точки, лазерный импульс, кремний, германий.

LASER-INDUCED DIFFUSION PROCESSES IN Ge/Si HETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM DOTS

Gatskevich E. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Modeling of thermostimulated diffusion in GeSi heterostructures with quantum dots under conditions of irradiation by nanosecond laser pulses has been carried out. Modes of partial and complete dissolution of quantum dots were determined.

Keywords: diffusion, heterostructures, quantum dots, laser pulse, silicon, germanium.

Адрес для переписки: Гацкевич Е. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elena@bk.ru

Ранее в работах [1,2] исследованы возможности модификации Ge/Si гетероструктур с квантовыми точками под действием наносекундных лазерных импульсов. В частности, в работе [1] показана возможность увеличения степени однородности параметров квантовых точек (КТ) в ансамбле при наносекундном лазерном облучении. Указанный эффект возникает вследствие плавления нанокластеров, диффузии Ge в Si, т. е. частичного или полного растворения КТ. Настоящая работа посвящена моделированию диффузионных процессов в окрестности нанокластера при наносекундном лазерном воздействии.

Для моделирования диффузионных процессов, происходящих в КТ, воспользуемся следующими приближениями.

1) Согласно данным [3] просвечивающей электронной микроскопии отношение высоты КТ к основанию равно 0,1-0,2. Учитывая, что КТ имеют сплюснутую форму, будем аппроксимировать слой с квантовыми точками $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ слоем с некоторой эффективной толщиной d_{eff} .

2) Будем считать, что концентрация Ge в слое характеризуется эффективным параметром x , причем начальная концентрация в слое C_0 равна 0,8, что соответствует экспериментальным данным [3], полученным ранее методом комбинационного рассеяния света. Отметим, что значения параметра x немодифицированных образцов определяются условиями роста КТ.

3) Температуру слоя и близлежащей области будем считать постоянной и равной некоторой величине T .

При моделировании рассмотрим три режима лазерного воздействия. В первом режиме эффективная температура слоя меньше температуры плавления объемного Ge ($T_{\text{mGe}} = 1210$ K), т. е. и германий и кремний находятся в кристаллическом состоянии, и диффузия идет в твердой фазе. Во втором режиме T выше температуры плавления объемного Si ($T_{\text{mSi}} = 1687$ K), в этой ситуации диффузия происходит в жидком состоянии. В третьем режиме T имеет промежуточное значение между температурами плавления германия и кремния. Будем считать, что в этой ситуации будут расплавлены $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ нанокластеры, а Si будет находиться в кристаллической фазе.

Время диффузии в первом режиме порядка действия лазерного импульса, во втором и третьем это время существования всей системы или нанокластера в расплавленном состоянии.

При сделанных выше предположениях диффузионную задачу можно свести к упрощенной форме и сформулировать следующим образом:

$$\frac{\partial C(z)}{\partial t} = D(T) \left(\frac{\partial^2 C(z)}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

здесь $C(z)$ – концентрация, координата z направлена перпендикулярно к слою с КТ, $D(T)$ – коэффициент диффузии Ge в Si при температуре T . Уравнения диффузии для кремния можно не записывать, поскольку концентрация кремния равна 1-С.

Учитывая распределение германия в матрице и сделанные ранее приближения, начальные и граничные условия запишем в виде:

$$C(z, t = 0) = \begin{cases} 0, z \in [0, d_b] \\ C_0, z \in [d_b, d_b + d_{\text{eff}}] \\ 0, z \in [d_b + d_{\text{eff}}, d] \end{cases} \quad (2)$$

$$C|_{z=0} = 0, \quad C|_{z=d} = 0.$$

d_b соответствует глубине, на которой залегают КТ, d – толщина исследуемой гетероструктуры, d – достаточно велико по сравнению с d_{eff} .

В указанной постановке задача имеет аналитическое решение, которое может быть записано в виде:

$$C(z, t) = \frac{1}{2} C_0 \left[\text{erf} \left(\frac{d_b + d_{\text{eff}} - z}{2\sqrt{Dt}} \right) + \text{erf} \left(\frac{-d_b + d_{\text{eff}} + z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (3)$$

Согласно литературным данным [4] коэффициент диффузии жидкого Ge в расплаве Si $D = 2,5 \cdot 10^{-4}$ см²/с. Длина диффузии L_d за время t равна $\sqrt{Dt}$. Если считать, что время существования расплавленной фазы ~ 100 нс, то $L_d \approx 50$ нм, что намного превышает размеры КТ по высоте. Это означает, что при плавлении кремниевой матрицы происходит полное растворение КТ.

Коэффициент диффузии в твердой фазе на несколько порядков меньше. Диффузия описывается формулой:

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}},$$

где D_0 – некоторая постоянная, E_a – энергия активации диффузии, k_B – постоянная Больцмана. Согласно экспериментальным данным значения коэффициента диффузии от комнатной температуры и до температуры плавления меняются от 10^{-15} до 10^{-11} см²/с, длина диффузии L_d при $t = 100$ нс при этом меняется от 0,0001 до 0,01 нм, что намного меньше размера КТ.

Для третьего режима моделирование диффузии Ge в слое с КТ и в его окрестности с течением времени проводилось для $D = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см²/с. Рассматривались режимы облучения, при которых КТ находятся в расплавленном состоянии от 40 до 500 нс. Растворением слоя КТ будем считать состояние, когда концентрация Ge в слое уменьшилась в два раза ($x = 0,4$). Скорость диффузионных процессов (растворение слоя) зависит от толщины слоя. Увеличение толщины слоя ведет

к замедлению процесса растворения. Так при толщине слоя 2 нм за время 160 нс концентрация Ge в центре слоя достигает величины 0,58, для слоя толщиной 4 нм эта величина составляет только 0,78.

Временные изменения концентрации Ge в центре слоя и на расстоянии 4 нм от него показаны на рисунке 1. Видно, что для растворения германиевого слоя в кремнии необходимы достаточно большие времена нахождения слоя в расплавленном состоянии. Для слоя толщиной 2 нм это время приближается к 500 нс, для 4 нм время растворения значительно больше.

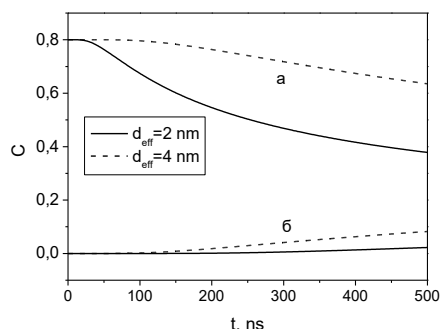


Рисунок 1 – Временные зависимости концентрации Ge в центре (а) и в окрестности (б), расстоянии от центра слоя 4 нм) слоя КТ с указанными значениями эффективной толщины слоя

В ситуации с КТ имеется ряд факторов, которые повышают скорость диффузионных процессов. Один из них - малость размеров КТ, что приводит к изменению поверхностной энергии на границе КТ – объемный Si. Другим фактором является повышенная концентрация вакансий вблизи и в самой КТ, что увеличивает вероятность перескоков атомов при диффузии.

Проведено теоретическое исследование лазерно-индуцированных процессов массопереноса в гетероструктурах с квантовыми точками. Установлены режимы, при которых импульсное лазерное воздействие приводит к растворению квантовых точек.

Литература

1. Effect of pulsed laser action on hole energy spectrum of Ge/Si self-assembled quantum dots / A. I. Yakimov [et al.] // Physical Review B. – 2005. – № 11. – Art. 115318.
2. Модификация квантовых точек в Ge-Si наноструктурах при импульсном лазерном воздействии / А. В. Двуреченский [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2006. – № 2. – С. 74–78.
3. Raman scattering diagnostics of as grown and pulsed laser modified Ge-Si nanostructures with quantum dots / E. I. Gatskevich [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2007. – Vol. 6728. – Art. 67281U.
4. All laser-assisted heteroepitaxial growth of Si_{0.8}Ge_{0.2} on Si (100): Pulsed laser deposition and laser induced melting solidification / R. Serna [et al.] // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – P. 1781–1783.

УДК 535.327, 535.012

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЛИНЗА В АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ KY(WO₄)₂ И KYb(WO₄)₂

Герцова А. В., Юмашев К. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы оптическая сила и астигматизм термической линзы в лазерных активных элементах из кристаллов KY(WO₄)₂ и KYb(WO₄)₂ различной вырезки для случая продольной накачки. Определены атермальные вырезки активных элементов из данных кристаллов, при которых термическая линза отсутствует или же является положительной с низким астигматизмом.

Ключевые слова: кристаллы двойных вольфраматов, термическая линза, атермальные направления.

THERMAL LENSING IN LASER ACTIVE ELEMENTS BASED ON KY(WO₄)₂ AND KYb(WO₄)₂ CRYSTALS

Hertsova A. V., Yumashev K. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The optical power and astigmatism of the thermal lens in laser active elements made of KY(WO₄)₂ and KYb(WO₄)₂ crystals of different cuttings for the case of end pumping are studied. Athermal cuttings of active elements from these crystals are determined, in which the thermal lens is absent or is positive with low astigmatism.

Keywords: double tungstates, thermal lensing, athermal directions.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kuyumashev@bntu.by

В настоящей работе исследована термическая линза (ТЛ), возникающая в лазерных активных элементах (ЛАЭ) из кристаллов KY(WO₄)₂ (KYW) и KYb(WO₄)₂ (KYbW) различной вырезки для случая продольной накачки и предложены атермальные направления (AD) для данных ЛАЭ.

Кристаллы KYW и KYbW, активированные ионами редких земель (Yb, Er, Tm), являются эффективными лазерными активными средами, генерирующими в ближней ИК области спектра [1–5].

Рассмотрены три вырезки кристаллов, при которых свет (с длиной волны 1,06 мкм)

распространяется по различным направлениям $\mathbf{k}$ в плоскостях N_m-N_g (mg-вырезка), N_p-N_m (pm-вырезка) и N_p-N_g (pg-вырезка) (рисунок 1). При всех направлениях распространения (определяемых углом ρ , рисунок 1) свет имеет поляризацию $E//N_p$ для mg-вырезки, $E//N_g$ для pm-вырезки и $E//N_m$ для pg-вырезки. ЛАЭ имеет форму тонкого диска, радиус которого значительно меньше его длины. Рассчитывается оптическая сила ТЛ $D \sim \Delta$ с учетом двух эффектов – зависимости показателя преломления материала ЛАЭ от температуры и продольной деформации ЛАЭ. Параметр Δ носит название обобщенного термооптического коэффициента. Вклад в оптическую силу ТЛ фотоупругого эффекта не рассматривается, поскольку для исследуемых кристаллов в настоящее время отсутствует полная информация об упруго-оптических постоянных. Используемую методику расчетов можно найти в [6].

ТЛ в общем случае является астигматической. Оптическая сила такой ТЛ для световых лучей, распространяющихся в разных меридиональных плоскостях (определяемых направлением распространения света и некоторой ортогональной ему плоскостью), различна. При этом существуют две взаимно ортогональные меридиональные плоскости (главные), для которых оптическая сила ТЛ максимальна (плоскость А) и минимальна (плоскость В). Степень астигматизма ТЛ определяется как $S_\Delta = (\Delta_A - \Delta_B)$, то есть как разность между коэффициентами Δ для меридиональных плоскостей А (Δ_A) и В (Δ_B). Положение плоскостей А и В описывается соответственно углами θ_A и $\theta_B = \theta_A + 90^\circ$, отсчитываемыми от направления поляризации света.

На рисунке 2 приведены зависимости коэффициентов Δ_A и Δ_B и степени астигматизма S_Δ ТЛ от угла ρ (направления распространения света) для различных вырезов кристалла KYW.

Строгое определение атермальности направления распространения света требует выполнения условия $\Delta_A = \Delta_B = 0$ и, соответственно, $S_\Delta = 0$, которое практически невозможно реализовать для кристаллов с низкой симметрией. Поэтому для ЛАЭ под АД понимается такая его ориентация, при которой ТЛ является положительной и близкой к сферической. Это означает, что выполняются условия $\Delta_A, \Delta_B > 0$ и $S_\Delta \approx 0$. Для одних лазерных систем наиболее критичным является малая оптическая сила ТЛ, а для других – малый астигматизм ТЛ. Первое из указанных условий определяется допустимой нестабильностью лазерного резонатора при интенсивной накачке, а второе – необходимым качеством лазерного пучка (его эллиптичности). Например, для микрочипа лазеров сильная положительная ТЛ не критична для стабильности резонатора, в то время как желателен почти круглый выходной лазерный пучок.

В соответствии с этим в настоящей работе рассматриваются два типа АД: АД₁ – когда выполняются условия $\Delta_A, \Delta_B = 0$ и $S_\Delta = 0$, и АД₂ – когда

выполняются условия $\Delta_A, \Delta_B > 0$ и $S_\Delta \approx 0$. Следует отметить, что направления АД₁ могут существовать в кристаллах с отрицательными термическими коэффициентами показателя преломления dn/dT . В этом случае положительный вклад в оптическую силу ТЛ эффекта деформации ЛАЭ компенсируется отрицательным вкладом в оптическую силу ТЛ эффекта зависимости показателя преломления материала ЛАЭ от температуры.

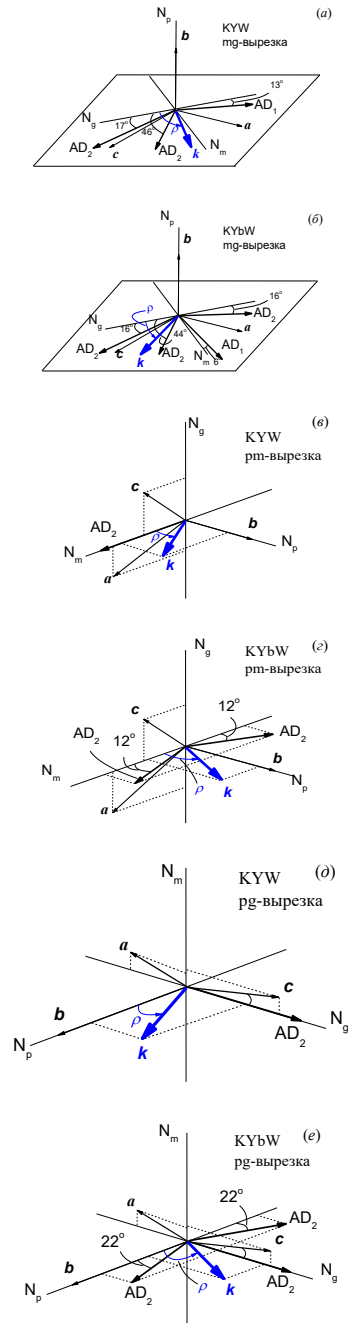


Рисунок 1 – Взаимная ориентация кристаллографических осей $\{a, b, c\}$ и главных осей оптической индикатрисы $\{N_p, N_m, N_g\}$ для кристаллов KYW и KYbW (a, б) mg-, (в, г) mp- и (д, е) pg-вырезки. АД₁ и АД₂ – атермальные направления распространения света

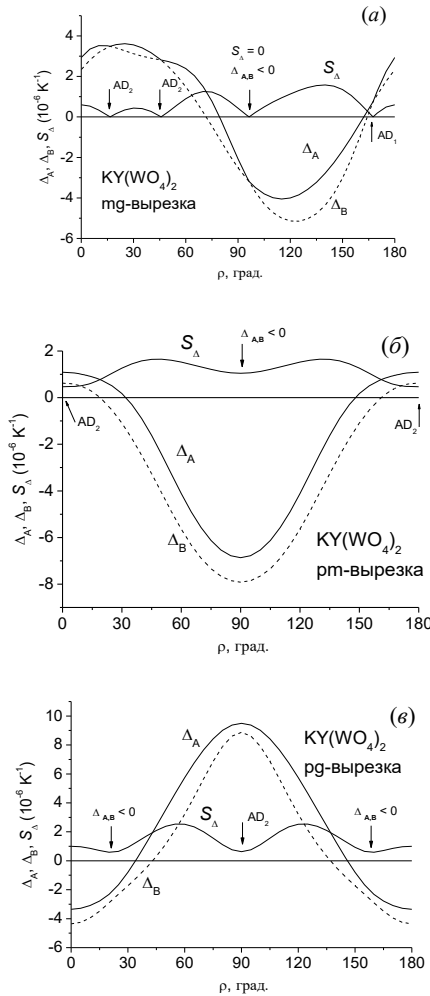


Рисунок 2 – Коэффициенты Δ_A и Δ_B и степень астигматизма $S_A = (\Delta_A - \Delta_B)$ ТЛ для (а) mg-, (б) pm- и (в) pg-вырезов кристалла KYW

Для mg-вырезки (поляризация света $E//N_p$) степень астигматизма $S_A = 0$ для угла $\rho = 167,5^\circ$, при этом коэффициенты Δ_A и Δ_B положительны и малы ($\sim 0,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 2 (а)]. Таким образом, направление $\rho = 167,5^\circ$, которое составляет угол $-12,5^\circ$ с осью N_g , можно считать AD_1 . При углах $\rho = 16,6^\circ$ и $\rho = 45,8^\circ$ степень астигматизма для mg-вырезки также $S_A = 0$, однако коэффициенты Δ_A и Δ_B положительные и не равны нулю ($3,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $2,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно) [рисунок 2 (а)]. Поэтому направления $\rho = 16,6^\circ$ и $\rho = 45,8^\circ$ следует отнести к AD_2 . Для угла $\rho = 96,4^\circ$ степень астигматизма также $S_A = 0$, но коэффициенты Δ_A и Δ_B отрицательные ($-3,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 2 (а)], вследствие чего данное направление не является атермальным в соответствии с введенными выше требованиями.

Для pm-вырезки (поляризация света $E//N_g$) кристалла KYW атермальных направлений AD_1 не существует [рисунок 2 (б)]. При углах $\rho = 0^\circ$ и $\rho = 180^\circ$, которые соответствуют распространению света вдоль оси N_m , степень астигматизма

принимает наименьшее значение для данной вырезки ($S_A = 0,47 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 2 (б)]. При этом коэффициенты Δ_A и Δ_B положительные и также имеют наименьшие значения для данной вырезки ($1,09 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $0,62 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно). Все это позволяет направление $\rho = 0^\circ$ (N_m -вырезка) отнести к AD_2 . Для угла $\rho = 90^\circ$ (N_p -вырезка) зависимость степени астигматизма от угла вырезки ρ имеет минимум, равный $S_A = 1,05 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, но коэффициенты Δ_A и Δ_B отрицательные ($-6,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $-7,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 2 (б)]. Поэтому данное направление не относится к атермальному.

Для pg-вырезки (поляризация света $E//N_m$) кристалла KYW атермальных направлений AD_1 не наблюдается [рисунок 2 (в)]. При углах $\rho = 21^\circ$ и $\rho = 159^\circ$, которые соответствуют распространению света под углом 21° к оси N_p (два различных направления), степень астигматизма принимает наименьшее значение для данной вырезки ($S_A = 0,59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 2 (в)].

Однако коэффициенты Δ_A и Δ_B отрицательные ($-2,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $-2,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно), и данные направления не являются атермальными. Для угла $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) зависимость степени астигматизма от угла вырезки ρ имеет минимум $S_A = 0,63 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Коэффициенты Δ_A и Δ_B положительные: $\Delta_A = 9,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $\Delta_B = 8,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким образом, направление $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) можно отнести к атермальному AD_2 .

Следует отметить, что полученные в настоящей работе значения степени астигматизма и обобщенных термооптических коэффициентов для pg-вырезки кристалла KYW находятся в хорошем согласии с литературными данными. Для настоящей работы (работы [7]): $S_A = 0,63$ (0,5), $\Delta_A = 9,5$ (11,0), $\Delta_B = 8,8$ (10,5) для N_g -вырезки; $S_A = 1,0$ (1,0), $\Delta_A = -3,3$ (-2,1), $\Delta_B = -4,3$ (-3,1) для N_p -вырезки; AD_2 для N_g -вырезки (AD_2 для N_g -вырезки).

Значения угла θ_A , показывающего положение меридиональной плоскости А по отношению к направлению поляризации света, приведены на рисунок 3 (а, в, д) для различных вырезов кристалла KYW. Для mg-вырезки кристалла KYW угол θ_A не зависит от угла ρ и составляет 0° или 90° . Направление плоскости А совпадает с направлением поляризации света $E//N_p$ для углов $16,6^\circ < \rho < 45,8^\circ$ и $96,4^\circ < \rho < 167,5^\circ$, а для углов $0^\circ < \rho < 16,6^\circ$, $45,8^\circ < \rho < 96,4^\circ$ и $167,5^\circ < \rho < 180^\circ$ с направлением поляризации $E//N_p$ совпадает плоскость В [рисунок 3 (а)].

При значениях угла $\rho = 16,6^\circ$, $45,8^\circ$, $96,4^\circ$ и $167,5^\circ$, как показывает рисунок 2 (а), направления максимальной (минимальной) оптической силы ТЛ становится направлением минимальной (максимальной) оптической силы ТЛ. То есть, направление плоскости А (В) становится направлением плоскости В (А).

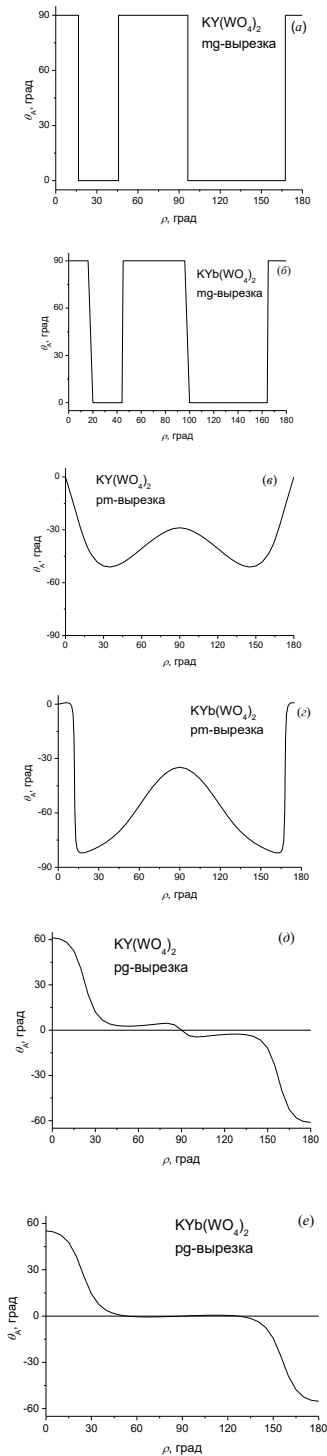


Рисунок 3 – Ориентация меридиональной плоскости А, определяемая углом θ_A , для (а, б) tg -, (в, г) rt - и (д, е) rg -вырезов кристаллов KYW и KYbW

В случае rt -вырезки только при углах $\rho = 0^\circ$ и 180° (N_m -вырезка) с направлением поляризации света ($E//N_g$) совпадает одна из главных меридиональных плоскостей (плоскость А) [рисунок 3 (в)]. Для N_m -вырезки угол $\theta_A = 0^\circ$. Для rg -вырезки только при угле $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) плоскость А

($\theta_A = 0^\circ$) совпадает с направлением поляризации света $E//N_m$ [рисунок 3 (д)]. Следует отметить, что для rt -вырезки при угле $\rho = 90^\circ$ (N_p -вырезка, поляризация света $E//N_g$) и rg -вырезки при $\rho = 0^\circ$ (N_p -вырезка, поляризация света $E//N_m$) [рисунок 3 (в, д)] кристалл KYW обладает плоскостью упругой симметрии, перпендикулярной направлению распространения света. В этом случае ни одна из плоскостей А или В не совпадает с направлением поляризации света. При этом углы $\theta_{A,B}$ не зависят от коэффициентов термического расширения, то есть определяются только анизотропией упругих констант кристалла.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициентов Δ_A и Δ_B и степени астигматизма S_A ТЛ от вырезки (определяемой углом ρ) кристалла KYbW.

Для tg -вырезки кристалла KYbW (поляризация света $E//N_p$) степень астигматизма $S_A = 0$ для угла $\rho = 96,0^\circ$, при оба коэффициента Δ_A и Δ_B равны нулю. [рисунок 4 (а)]. Таким образом, направление $\rho = 96,0^\circ$, которое составляет угол $6,0^\circ$ с осью N_m , является AD_1 . При углах $\rho = 16,0^\circ$, $44,1^\circ$ и $164,2^\circ$ степень астигматизма для tg -вырезки также $S_A = 0$, коэффициенты Δ_A и Δ_B положительные и не равны нулю ($4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $4,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $1,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно) [рисунок 4 (а)]. Следовательно, эти направления являются атермальными AD_2 .

Для rt -вырезки (поляризация света $E//N_g$) кристалл KYbW атермальных направлений AD_1 не имеет [рисунок 4 (б)]. При углах $\rho = 12^\circ$ и $\rho = 168^\circ$ степень астигматизма практически равна нулю ($S_A = 0,02 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). При этом коэффициенты Δ_A и Δ_B положительные и равны соответственно $3,92 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $3,90 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Все это позволяет считать, что углы $\rho = 12^\circ$ и 168° соответствуют AD_2 . Для угла $\rho = 90^\circ$ (N_p -вырезка) зависимость степени астигматизма от угла ρ имеет минимум $S_A = 1,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, но отрицательные коэффициенты Δ_A и Δ_B ($-3,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $-4,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно) [рисунок 4 (б)] свидетельствуют о том, что N_p -вырезка для KYbW не относится к атермальному направлению.

Для rg -вырезки (поляризация света $E//N_m$) кристалла KYbW атермальных направлений AD_1 не наблюдается [рисунок 4 (в)]. При углах $\rho = 22^\circ$ и $\rho = 158^\circ$, которые соответствуют распространению света под углом 22° к оси N_p (два различных направления), степень астигматизма принимает наименьшее значение для данной вырезки ($S_A = 0,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [рисунок 4 (в)]. Коэффициенты Δ_A и Δ_B при этом положительные ($2,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $1,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно), и данные направления являются AD_2 . Для угла $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) зависимость степени астигматизма от угла вырезки ρ имеет минимум с $S_A = 0,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Коэффициенты $\Delta_A = 11,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $\Delta_B = 11,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [рисунок 4 (в)] существенно больше по сравнению с данными для угла $\rho = 22^\circ$, однако они положительные и позволяют считать направление $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) AD_2 .

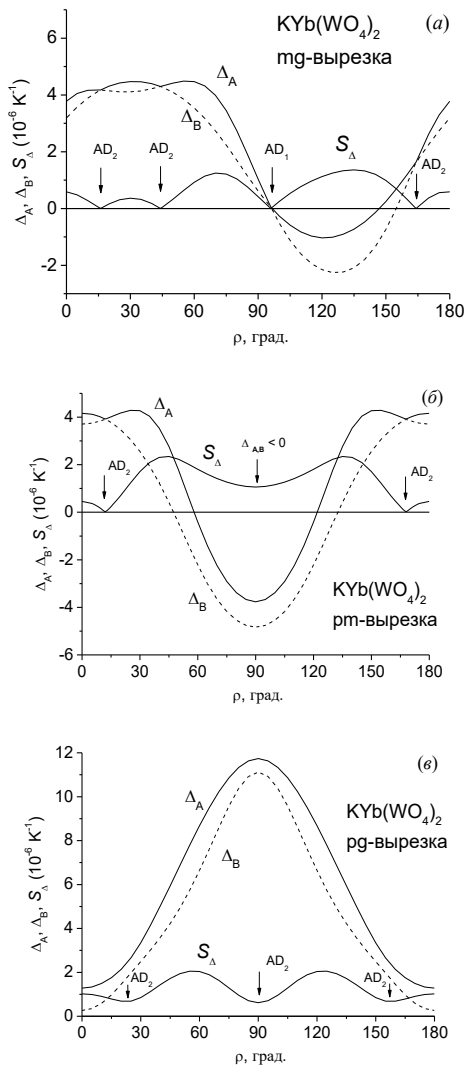


Рисунок 4 – Коэффициенты Δ_A и Δ_B и степень астигматизма $S_A = (\Delta_A - \Delta_B)$ ТЛ для (а) mg-, (б) pm- и (в) pg-вырезов кристалла KYbW

Положение меридиональной плоскости А по отношению к направлению поляризации света для различных вырезов ЛАЭ из кристалла KYbW показывает рисунок 3 (б, г, е). Для mg-вырезки углы θ_A и θ_B не зависят от угла ρ и равны 0 или 90° . Направление плоскости А совпадает в направлении поляризации света $E//N_p$ для углов $16,0^\circ < \rho < 44,1^\circ$ и $96,0^\circ < \rho < 164,2^\circ$, а для углов $0^\circ < \rho < 16,0^\circ$, $44,1^\circ < \rho < 96,0^\circ$ и $164,2^\circ < \rho < 180^\circ$ с направлением поляризации $E//N_p$ совпадает

плоскость В [рисунок 3 (б)]. При углах $\rho = 16,0^\circ$, $44,1^\circ$, $96,0^\circ$ и $164,2^\circ$, как показывает рисунок 3 (б), направления максимальной и минимальной оптической силы ТЛ взаимно меняются, то есть, направление плоскости А становится направлением плоскости В, а направление плоскости В – направлением плоскости А.

Для pm-вырезки только при углах $\rho = 0^\circ$ и 180° (N_m -вырезка) с направлением поляризации света ($E//N_g$) совпадает одна из меридиональных плоскостей (плоскость А) [рисунок 3 (г)]. В случае pg-вырезки только при угле $\rho = 90^\circ$ (N_g -вырезка) плоскость А ($\theta_A = 0^\circ$) совпадает с направлением поляризации света $E//N_m$ [рисунок 3 (е)].

Для pm-вырезки при угле $\rho = 90^\circ$ (N_p -вырезка, поляризация света $E//N_g$) и pg-вырезки при $\rho = 0^\circ$ (N_p -вырезка, поляризация света $E//N_m$) [рисунок 3 (г, е)] кристалл KYW (как и кристалл KYbW) обладает плоскостью упругой симметрии, перпендикулярной направлению распространения света.

На рисунке 1 собраны данные по атермальным направлениям AD_1 и AD_2 , полученные для всех исследованных вырезов кристаллов KYW и KYbW. Ориентация и количество атермальных направлений для KYW и KYbW несколько различаются.

Литература

1. Kuznetsov, S. A. A highly efficient, compact Yb:KYW laser for mobile precision systems / S. A. Kuznetsov, V. S. Pivtsov // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44, № 5. – P. 444–447.
2. In-band pumped room-temperature Er:KY(WO₄)₂ laser emitting around 1.6 μ m / K. N. Gorbachenya, V. E. Kisel, A. S. Yasukevich [et al.] // Laser Physics. – 2013. – Vol. 23. – Art. 025005.
3. Gaponenko, M. Efficient diode-pumped Tm:KYW 1.9- μ m microchip laser with 1 W cw output power / M. Gaponenko, N. Kuleshov, T. Südmeyer // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, № 10. – P. 11578–11582.
4. Continuous-wave lasing of a stoichiometric Yb laser material: KYb(WO₄)₂ / P. Klopp, V. Petrov, U. Griebner [et al.] // Optics Letters. – 2003. – Vol. 28, № 5. – P. 322–324.
5. Erbium Spectroscopy and 1.5- μ m Emission in KGd(WO₄)₂:Er,Yb Single Crystals / X. Mateos, M. C. Pujol, F. Güell [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2004. – Vol. 40, № 6. – P. 759–770.
6. Hertsova, A. V. Thermal lensing in monoclinic yttrium oxyorthosilicate laser crystals / A. V. Hertsova, K. V. Yumashev, A. M. Malyarevich // Laser Physics. – 2025. – Vol. 35, № 4. – Art. 045001.
7. Yumashev, K. Thermal stress and end-bulging in monoclinic crystals: The case study of double tungstates / K. Yumashev, P. Loiko // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, № 13. – P. 3857–3866.

УДК 621.3.038.825.2

МИКРОЧИП ЛАЗЕР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛИДАРНЫХ СИСТЕМАХ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА

Горбаченя К. Н.^{1,2}, Батырев Р. Н.², Шабасев И. О.², Есман Д. Ю.², Кисель В. Э.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Национальный детский технопарк

Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы разработан компактный высокочастотный источник лазерного излучения (твердотельный микрочип лазер) с длиной волны в спектральной

области 1,5 мкм для лидарной системы, предназначенной для обеспечения безопасности пути во время хода поезда.

Ключевые слова: лазер, микрочип, эрбий, лидар.

MICROCHIP LASER FOR THE USAGE IN LIDAR SYSTEMS OF UNMANNED VEHICLES

Gorbachenya K. N.^{1,2}, Batyrev R. N.², Shabaev I. O.², Esman D. Y.², Kisel V. E.¹

¹Belarusian National Technical University

²The National Children's Technopark
Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research, a compact high-frequency laser source (solid-state microchip laser) with a wavelength in the spectral region of 1.5 μm was developed for a lidar system designed to ensure track safety during train travel.

Keywords: neodymium, borate crystals, spectroscopic properties.

Адрес для переписки: Горбаченя К. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorbby@bntu.by

Железнодорожный транспорт играет ведущую роль в перевозке пассажиров и грузов на средние и дальние расстояния, поэтому обеспечение его безопасности имеет первостепенное значение. Одной из важных задач является своевременное обнаружение и устранение препятствий на пути движения поездов. Для решения такой задачи перспективно использование лидаров, формирующих трехмерное изображение окружения и способных обнаруживать объекты на пути следования поезда даже в условиях недостаточной видимости. Современный 3D-лидар увеличенной дальности (до нескольких сотен метров) может лечь в основу системы предотвращения столкновений на железной дороге.

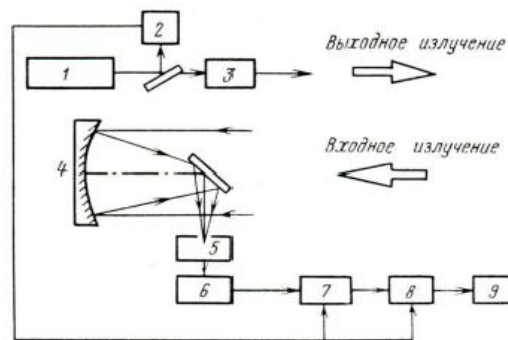
Ключевым элементом каждого лидара является источник лазерного излучения. Для транспортных приложений он должен быть компактным, устойчивым к вибрациям, его излучение должно быть безопасно для органов зрения окружающих. Таким образом, разработка компактных и надежных лазерных источников излучения, которые могут эффективно интегрироваться в лидарные системы, является важной научно-технической задачей, решение которой позволит существенно повысить уровень безопасности железнодорожного транспорта Республики Беларусь.

На рисунке 1 показана принципиальная схема импульсного лидара [1].

Излучение лазера формируется передающей оптической системой, которая коллимирует выходной пучок, минимизируя его расходимость. Часть лазерного излучения отводится полупрозрачным зеркалом на блок контроля выходного излучения, связанного с усилительно-преобразующим электронным трактом и процессором.

Блок контроля выходного излучения задает начало отсчета времени и используется для калибровки интенсивности импульса, необходимой для проведения количественной интерпретации данных. В ряде случаев, когда длина волны выходного излучения перестраивается, блок контроля выходного излучения выполняет функции измерения и контроля длины волны излучения.

Отраженное от объекта исследования излучение собирается приемной оптической системой и поступает в спектроанализатор, предназначенный для выделения рабочего спектрального диапазона, в котором производятся измерения. Одновременно спектроанализатор подавляет фоновое излучение (помеху), т. е. он осуществляет спектральную фильтрацию сигнала. Сигнал с выхода приемника излучения усиливается, фильтруется и обрабатывается в цифровой или аналоговой форме.



1 – лазер, 2 – блок контроля выходного излучения, 3 – передающая оптическая система, 4 – приемная оптическая система, 5 – спектроанализатор, 6 – приемник излучения, 7 – усилительно-преобразующий электронный тракт, 8 – процессор, 9 – выходное устройство

Рисунок 1– Принципиальная схема импульсного лидара

В данной исследовательской работе предложено использование микрочип лазера с диодной накачкой на основе кристалла $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, в качестве источника лазерных импульсов лидара для беспилотного транспорта.

В конструкцию микрочип лазера входит медное основание, внешний вид которого представлен на рисунке 2. Он представляет собой цилиндрическую деталь, внешний диаметр которой составляет 25,4 мм. На внешнем диаметре выполнена проточка, которая выполняет функцию теплоотвода в основании выполнено сквозное отверстие

диаметром 12,7 мм, необходимое для установки втулок с оптическими элементами. Конструкция основания имеет резьбовые отверстия для установки стопорных винтов с целью фиксации положения, установленных в нем втулок.



Рисунок 2 – Медное основание микрочип лазера

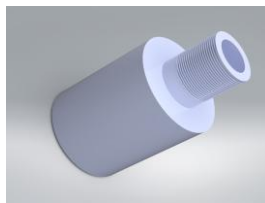


Рисунок 3 – Втулка крепления ЛД и ФЛ

В основание устанавливается две втулки: первая предназначена для крепления коннектора SMA905 лазерного диода (ЛД) и фокусирующей линзы (ФЛ), вторая втулка используется для крепления чипа, состоящего из активной среды и пассивного затвора. На рисунке 3 приведена втулка для крепления коннектора лазерного диода и фокусирующей линзы. Она представляет собой цилиндрическую деталь из материала Д16Т, внешним диаметром 12 мм, с наружной резьбой для крепления коннектора SMA-905 лазерного диода и внутренней резьбой для установки фокусирующей линзы С340 (Thorlabs) с фокусным расстоянием 4,51 мм на расстоянии около 9 мм от выхода излучения из волокна. Такая установка линзы обеспечивает фокусировку излучения накачки в пятно диаметром 120 мкм. Втулка крепления чипа (рисунок 3) представляет собой медную цилиндрическую деталь с внешним диаметром 12 мм с выполненной проточкой диаметром 9 мм и глубиной 7 мм, куда устанавливается чип. Чип закрепляется в втулке с помощью резьбового кольца.

Разработанная конструкция корпуса лазера (рисунок 4) обеспечивает установку в нем лазерного диода накачки с волоконным выводом излучения, основания микрочип лазера и коллимирующей линзы.

Корпус изготавливается из материала Д16Т. Для установки корпуса в конструкцию лидара на

вынесенных площадках предусмотрены четыре отверстия для крепления винтами М6. В отверстие корпуса для выхода лазерного излучения закрепляется при помощи оптического клея кремниевый фильтр, который предназначен для отсекающей остаточной мощности накачки и пропуска излучения лазерной генерации.

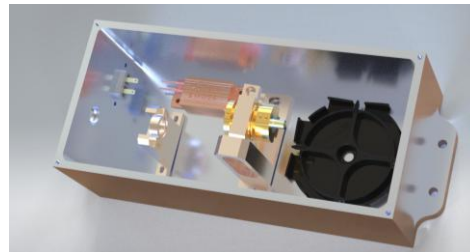


Рисунок 4 – Внешний вид корпуса лазера

Выходные характеристики лазера представлены на рисунке 5. Длительность лазерных импульсов не превышала 5 нс, частота повторения достигла 70 кГц. Максимальная энергия выходных импульсов составила 5 мкДж на длине волны генерации 1531 нм. Поперечный профиль интенсивности лазерного пучка хорошо аппроксимировался функцией Гаусса, значение M^2 -фактора не превышало 1,5.

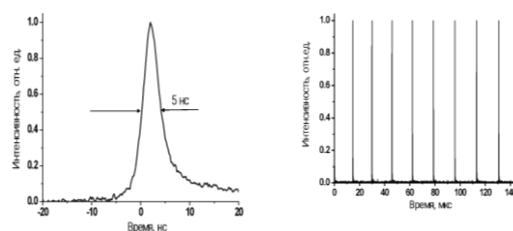


Рисунок 5 – Осциллограммы выходных импульсов

Выполнен энергетический расчет лидара. Показано, что при использовании разработанного лазерного источника возможно обнаружения объекта на расстоянии до 500 м.

Литература

1. Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу «Лидары и сканеры»: учеб. пособ. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2015.

УДК 621.3.038.825.2

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Горбаченя К. Н.^{1,2}, Зятягин В. Д.², Лапоухов Е. А.², Кисель В. Э.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Национальный детский технопарк

Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы разработан и изготовлен образовательный лабораторный комплекс для макетирования твердотельного лазера с диодной накачкой, предназна-

ченный для изучения принципов работы и основных элементов современных твердотельных лазеров с диодной накачкой. Разработанный комплекс предполагается использовать в инженерно-технических центрах, функционирующих в учреждениях общего среднего образования.

Ключевые слова: неодим, кристаллы боратов, спектроскопические свойства.

EDUCATIONAL LABORATORY SETUP FOR STUDYING OF PRINCIPLES AND BASIC ELEMENTS OF MODERN SOLID-STATE DIODE-PUMPED LASERS

Gorbachenya K. N.^{1,2}, Zatyagin V. D.², Lapouhov E. A.², Kisel V. E.¹

¹Belarusian National Technical University

²The National Children's Technopark

Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research work, an educational laboratory complex for prototyping a solid-state laser with longitudinal diode pumping was developed and manufactured, intended for studying the operating principles and basic elements of modern solid-state lasers with diode pumping. The developed complex is intended to be used in engineering and technical centers operating in general secondary education institutions.

Keywords: neodymium, borate crystals, spectroscopic properties.

Адрес для переписки: Горбаченя К. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Твердотельные лазеры с диодной накачкой представляют собой важный класс лазерных устройств, широко применяемых в различных областях науки и техники, таких как медицина, телекоммуникации, обработка материалов и научные исследования. Эти лазеры обладают высокой эффективностью, компактностью и надежностью, что делает их незаменимыми в современных технологических процессах. Однако для понимания принципов их работы и освоения навыков юстировки необходимы специализированные образовательные лабораторные комплексы, которые позволяют студентам и школьникам наглядно изучать процессы получения лазерной генерации и проводить эксперименты. Данная тема является актуальной, так как она направлена на создание современного образовательного инструмента, который позволит учащимся изучать принципы работы лазеров, проводить эксперименты и исследовать характеристики лазерного излучения. Разработанный лабораторный комплекс может использоваться для выполнения учебных лабораторных практикумов и научных исследований, что способствует углублению знаний в области лазерных технологий.

Целью данной работы являлась разработка и изготовление лабораторного комплекса, который позволит изучать принципы работы твердотельных лазеров с диодной накачкой, а также проводить измерения мощностных, временных, спектральных и пространственных характеристик лазерного излучения. В рамках работы решены задачи по подбору компонентной базы, расчету оптических систем, сборке и юстировке лазерного излучателя, а также описанию устройства и принципа работы комплекса. Разработано техническое задание на изготовление образовательного лабораторного комплекса, в котором изложены основные требования к выходным характеристикам лазеров, входящих в состав стенда, к конструкции и эксплуатации проектируемого стенда.

На рисунке представлена принципиальная схема лазера на основе кристалла $\text{Er,Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (Er,Yb:YAB), который входит в состав лабораторного комплекса. Источником накачки лазера служит лазерный диод 1 с волоконным выводом излучения ($\lambda = 976$ нм, $\varnothing = 105$ мкм, $\text{NA} = 0,22$), который обеспечивает неполяризованное лазерное излучение с максимальной выходной мощностью до 10 Вт. Фокусировка излучения лазерного диода осуществляется с помощью коллимирующей и фокусирующей линз 2 ($f = 100$ мм и $f = 125$ мм). Во время экспериментов лазерный кристалл поддерживался при температуре 16°C с помощью водяного охлаждения и элементов Пельтье. Активная среда 4 представляет собой кристалл Er,Yb:YAB с размерами $3 \times 3 \times 2$ мм. Входное зеркало 3 для работы в непрерывном режиме имело покрытие, обеспечивающее высокое отражение ($R > 99,5\%$) на длине волны 1520 ± 5 нм и высокое пропускание ($T > 95\%$) на длине волны накачки около 976 нм. Покрытие выходного зеркала имело коэффициент отражения $R = 96,5\text{--}99\%$ на длине волны 1530 ± 5 нм. Для реализации лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, входное зеркало заменяется пассивным затвором $\text{Co:MgAl}_2\text{O}_4$ с начальным пропусканием 98.5% на длине волны 1520 нм. На входную сторону пассивного затвора было нанесено покрытие, обеспечивающее высокое отражение ($R > 99,5\%$) на длине волны 1520 ± 5 нм и высокое пропускание ($T > 95\%$) на длине волны накачки около 976 нм.

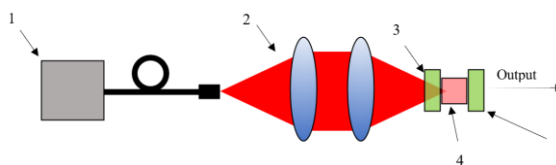


Рисунок 1 – Принципиальная схема лазера на основе кристалла Er,Yb:YAB

Расчет фокусирующей системы производился на основе ABCD –метода. Для ранее предложенной двухлинзовой системы фокусировки были определены положение и размеры изображения перетяжки лазерного пучка. Излучение накачки может быть сфокусировано в пятно диаметром около 120 мкм. График изменения размера пучка накачки при распространении вдоль оптической оси представлен на рисунке 2.

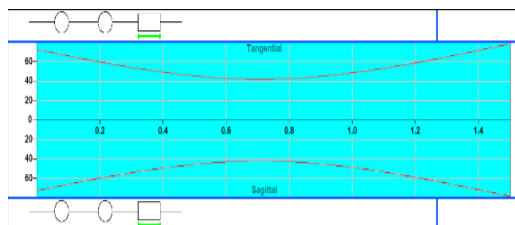


Рисунок 2 – График изменения размера пучка накачки внутри активного элемента

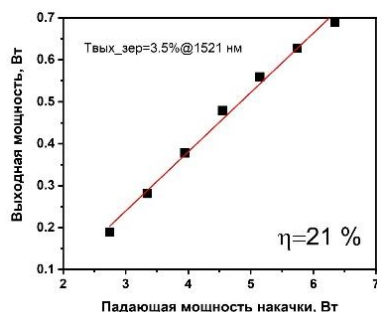


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности лазерной генерации от падающей мощности накачки лазерного диода

В соответствии с разработанной методикой сборки узлов крепления и юстировки оптических деталей была произведена сборка макета лазера. Путем юстировки выходного зеркала резонатора при падающей мощности накачки около 2 Вт получена лазерная генерация в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме генерации была получена при использовании выходного зеркала с пропусканием 3,5 % на длине волны генерации.

В непрерывном режиме генерации было получено лазерное излучение с максимальной выходной мощностью до 700 мВт на длине волны 1521 нм. Порог генерации по падающей мощности накачки составил около 2 Вт. Выходное излучение лазера было неполяризованным. На рисунке 3 приведена зависимость выходной мощности лазерной генерации от падающей мощности накачки лазерного диода.

Профиль распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка хорошо аппроксимировался функцией Гаусса, значение параметра распространения лазерного пучка M^2 -фактор не превышало 1,2 (рисунок 4). Таким образом, расходимость генерируемого излучения была близка к дифракционно-ограниченной.

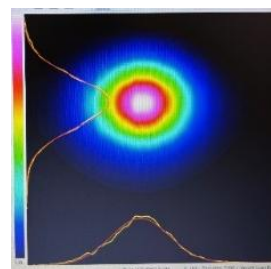


Рисунок 4 – Пространственный профиль пучка генерации

Внешний вид разработанного образовательного лабораторного комплекса для изучения принципов работы и основных элементов современных твердотельных лазеров с диодной накачкой приведен на рисунке 5.

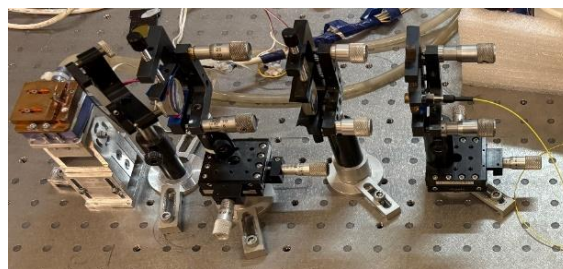


Рисунок 5 – Внешний вид комплекса

УДК 681

КОРРЕКЦИЯ ПАНОРАМНЫХ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКОВ

Гордейко Р. В.^{1,2}, Шашков С. Н.¹, Маляревич А. М.²

¹ООО «СОЛ инструментс»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Одной из ключевых задач современной спектроскопии комбинационного рассеяния является получение высококачественных спектров в широком диапазоне волновых чисел при сохранении высокого разрешения. В данной работе описывается проблема возникновения артефактов при «сшивке» отдельных спектральных участков в панорамный спектр и предлагается решение в виде специально разработанного программного алгоритма для автоматической коррекции этих неточностей. Проведена апробация алгоритма на образцах, содержащие микропластики.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, спектральное разрешение, панорамный спектр, программный алгоритм, микропластики.

CORRECTION OF PANORAMIC RAMAN SPECTRA AND ITS APPLICATION FOR MICROPLASTICS CONTENT ANALYSIS

Gordeyko R. V.^{1,2}, Shashkov S. N.¹, Malyarevich A. M.²

¹Ltd. "SOL instruments"

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. One of key challenges in modern Raman spectroscopy is obtaining high-quality spectra over a wide range while maintaining high resolution. The paper describes the problem of artifacts arising when stitching individual spectral regions into a panoramic spectrum and proposes a solution in the form of a specially developed software algorithm for automatic correction of these inaccuracies. The algorithm was tested using samples containing microplastics.

Keywords: raman spectroscopy, spectral resolution, panoramic spectrum, software algorithm, microplastics.

Адрес для переписки: Малеяревич А. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: malyar@bntu.by

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) широко используется для идентификации веществ, так как она позволяет анализировать молекулярный состав веществ по их уникальным колебательным спектрам, которые являются своего рода их «визитной карточкой». Сравнивая зарегистрированные КР спектры с библиотекой известных спектров, можно точно определить состав и структуру образца. Спектры КР должны при этом регистрироваться в широком спектральном диапазоне ($100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) и с достаточным спектральным разрешением, позволяющим хорошо детализировать структуру колебательных полос. Для этого используются дифракционные решетки с большой дисперсией, которые в свою очередь имеют высокую разрешающую способность.

Также в современных спектральных приборах используются охлаждаемые высокочувствительные матричные детекторы (ПЗС). Недостатком последних является их ограниченный размер, вследствие чего на детектор помещается довольно ограниченный участок спектра хорошего разрешения. Для получения спектра с приемлемым разрешением в широком спектральном диапазоне ($100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$, например), необходимо регистрировать ПЗС детектором отдельные участки спектра с их дальнейшей стыковкой (получение панорамных спектров). Для автоматизации данного процесса применяется специально разработанное программное обеспечение.

При этом получившийся панорамный спектр в местах стыковки, как правило, имеет артефакты в виду, например, непостоянства фоновых сигналов, неточностями в позиционировании решетки при регистрации отдельных спектральных интервалов (рисунок 1). Для получения корректного спектра требуется довольно продвинутое математическое обеспечение, позволяющее заменить перекрывающиеся участки спектра одним согласованным, минимизировать скачки интенсивностей в местах «сшивки» участков спектров и т. п. [1].

Процесс обработки экспериментальных данных состоит из трех ключевых этапов:

1. Идентификация областей перекрытия в спектре. На данном этапе анализируется спектр с целью обнаружения областей перекрывания по оси волновых чисел. Определяются границы этих областей и находятся общие для обоих сегментов диапазоны значений.

2. Приведение участков спектра к единой шкале. В обнаруженных областях перекрывания данные из разных спектральных сегментов могут быть изначально представлены в различающихся сетках волновых чисел. Для обеспечения точного сопоставления интенсивностей выполняется интерполяция данных. Это означает, что значения интенсивности для каждого из объединяемых участков пересчитываются на общую, единую сетку волновых чисел. Данная процедура гарантирует, что каждому значению на новой шкале будет соответствовать пара корректно сравнимых значений интенсивности из обоих спектров.

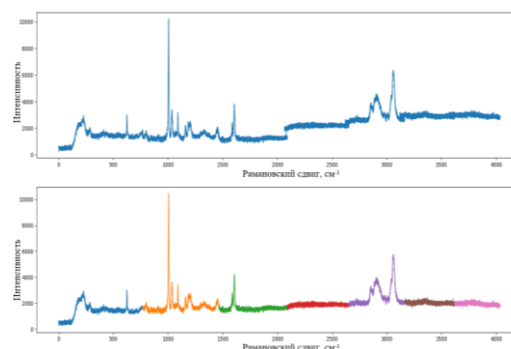


Рисунок 1 – Зарегистрированный (вверху) и обработанный (внизу) панорамный спектр

3. «Сшивание» участков спектра и формирование непрерывной кривой.

Финальный этап заключается в непосредственном объединении данных. В области перекрытия вычисляется результирующее значение интенсивности для каждого волнового числа. За пределами зон перекрытия используются данные из соответствующего уникального сегмента без изменений.

В результате формируется новая, цельная спектральная кривая, характеризующаяся плавными переходами и пригодная для последующего анализа (количественного или качественного) как единый объект.

С целью проверки применимости алгоритма коррекции спектров и его последующего использования для идентификации веществ по спектральным базам, проведена регистрация и корректировка спектров микропластиков, обнаруженных в рыбных консервах (рисунок 2).



Рисунок 2 – Оптическое изображение микропластиков в одной из рыбных консерв (отмечены кружками)

Пример одного из спектров приведен на рисунке 3. Экспериментальный спектр, обработан-

ный алгоритмом, идентифицируется как соответствующий полистиролу. В исследуемой пробе обнаруживаются дополнительно также микроскопические фрагменты полиэтилена, нейлона и полиамида.

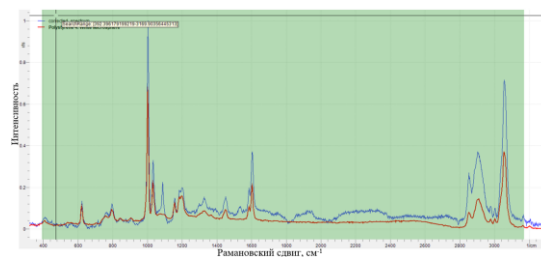


Рисунок 3 – Идентификация спектра исследуемого вещества (полистирол)

Таким образом, разработанный нами программный алгоритм позволяет производить быструю обработку панорамных спектров, устранять неточности (ошибки) и в последующем идентифицировать микропластики, например, в продуктах питания.

Литература

1. Stackoverflow: [сайт]. – URL: <https://stackoverflow.com/lfnfj,hfotybz>: 12.08.2025).

УДК 776.1:621.3.049.771

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ФОТОЛИТОГРАФИИ

Грудько Е. Н.¹, Савицкая Е. А.¹, Есман Д. Ю.^{1,2}, Рум В. Т.³, Федорцев Р. В.^{1,2}

¹УО «Национальный детский технопарк»

²Белорусский национальный технический университет

³ОАО «Планар»

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлен анализ и экспериментальное исследование метода компенсации дифракционных эффектов в проекционной фотолитографии путем введения прозрачной жидкости между фотошаблоном и кремниевой пластиной. Метод основан на использовании жидкости с высоким показателем преломления, что приводит к увеличению числовой апертуры проекционной системы и снижению критического размера структуры без изменения длины волны экспонирования. Дополнительно жидкость уменьшает амплитуду стоячих волн в фоторезисте, устраняя интерференционные картины и повышая однородность получаемого рисунка. Полученные данные подтверждают эффективность иммерсионной фотолитографии как метода компенсации дифракционных эффектов и демонстрируют ее перспективность для дальнейшего уменьшения размеров элементов.

Ключевые слова: фотолитография, фоторезист, дифракционные эффекты, интерференционные картины, подложка.

STUDY OF THE METHOD OF COMPENSATION OF DIFFRACTION EFFECTS IN PHOTOLITHOGRAPHY

Grudko E. N.¹, Savitskaya E. A.¹, Yesman D. Y.^{1,2}, Rum V. T.³, Fiodartsau R. V.^{1,2}

¹Educational Institution "National Children's Technopark"

²Belarusian National Technical University

³JSC «Planar»

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper presents an analysis and experimental study of a method for compensating diffraction effects in projection photolithography by introducing a transparent liquid between a photo template and a silicon wafer. The method is based on the use of a liquid with a high refractive index, which leads to an increase in the numerical aperture of the projection system and a decrease in the critical size of the structure without changing the exposure wavelength. Additionally, the liquid reduces the amplitude of standing waves in the photoresist, eliminating interference patterns and increasing the uniformity of the resulting pattern. The data obtained confirm the effectiveness

of immersion photolithography as a method for compensating diffraction effects and demonstrate its promise for further reducing the size of elements.

Keywords: photolithography, photoresist, diffraction effects, interference patterns, substrate.

Адрес для переписки: Есман Д. Ю., ул. Берута 17/128, г. Минск 220074, Республика Беларусь
e-mail: edaniil800@gmail.com

Современная микроэлектроника требует постоянного уменьшения критических размеров элементов интегральных схем. При переходе к технологическим нормам 65 нм и ниже классическая проекционная фотолитография сталкивается с фундаментальными ограничениями, связанными с дифракцией света. Дифракционные эффекты приводят к размыванию границ экспонируемого рисунка, появлению интерференционных картин и стоячих волн в слое фоторезиста. Это снижает точность формирования элементов, ухудшает однородность размеров и увеличивает шероховатость краев линий (LER) [1].

Применение жидкости в качестве иммерсионной среды, в проекционных системах, позволяет повысить разрешающую способность оптической системы.

Целью исследования является оценка эффективности метода добавления иммерсионной жидкости для компенсации дифракционных эффектов и улучшения качества экспонирования. Разрешающая способность проекционной системы описывается формулой Релея:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где CD – минимальный критический размер структуры, k_1 – технологический коэффициент, λ – длина волны излучения, $NA = n \sin \theta$ – числовая апертура.

В классической (сухой) литографии $n \approx 1$ (воздух). При добавлении жидкости с $n > 1$ числовая апертура возрастает, что прямо уменьшает CD . Например, для ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм) и n вода $\approx 1,44$ при оптимальном угле θ можно достичь $NA > 1,3$, что позволяет печатать элементы порядка 45 нм без смены длины волны.

В сухой литографии отражения от подложки и границы воздух–фоторезист создают стоячие волны. Жидкость сглаживает переход показателя преломления, снижает амплитуду отраженной волны и уменьшает контраст интерференционной картины.

Для засветки фотошаблона применялся матричный светодиодный модуль LED модели NVCUQ096A-D4 с длиной волны излучения $\lambda = 365$ нм, размеры переносимых элементов составляют от 0,6 до 1,0 мкм. Время экспонирования во всех экспериментах составляло $T = 1$ с. Геометрические параметры кремниевой пластины: диаметр 100 мм, толщина 0,5 мм. Геометрические параметры фотошаблона: квадрат 127×127 мм, толщина 10 мм. Точность формы фотошаблона: $N = 4$ интерференционных кольца Ньютона, общая и местная ошибка составляют $\Delta N = 1$ (одно интерференционное кольцо Ньютона). Для анализа точности формы

кремниевой пластины использовался интерферометр Verifire Zygo, результат измерений представлен на рисунке 1.

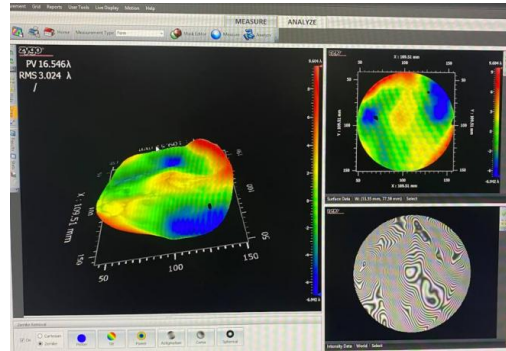


Рисунок 1 – Интерферограммы поверхности кремниевой пластины $\varnothing 100$ мм

В качестве иммерсионной жидкости применялась деионизированная вода ГОСТ 52501-2005 и глицерин дистиллированный ГОСТ 6824-96. Толщина слоя фоторезиста 1 мкм. Масштаб увеличения проекционного объектива $1\times$. Раствор для проявления позитивных резистов на основе гидроксида калия 0,9 % (КОН). Температура сушки позитивного резиста на горячей плите составила $t = 90\text{--}100^\circ\text{C}$ в течение 40–30 минут.

На поверхность фотошаблона была нанесена небольшая капля иммерсионной жидкости. После этого на фотошаблон с нанесенной жидкостью аккуратно поместили кремниевую пластину с нанесенным фоторезистом, обеспечивая максимальное возможное давление для достижения минимизации воздушных зазоров и обеспечения равномерного экспонирования.

На рисунке 2 представлен результат переноса наноструктур с фотошаблона на кремниевую пластину без применения иммерсионной жидкости. На изображении четко различимы интерференционные полосы, которые образовались из-за дифракционных эффектов. На рисунке 3 отчетливо видны наноструктуры, полученные с использованием воды в качестве иммерсионной жидкости.

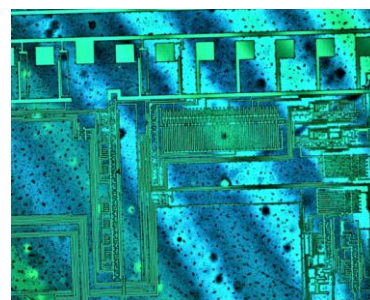


Рисунок 2 – Результат переноса наноструктур без использования иммерсионной жидкости

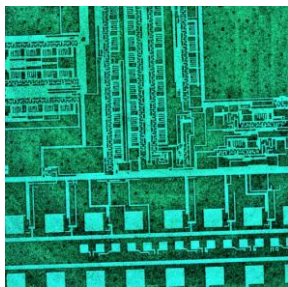


Рисунок 3 – Результат переноса наноструктур с использованием деионизированной воды

Отсутствие наноструктур на кремниевой пластинке, после проявления свидетельствует о том, что структура не была перенесена. Объяснение

УДК 681.7.069.24:633.81

ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ РОСТА СЕМЯН РАСТЕНИЙ

Гурман Д. В.², Федорцев Р. В.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Национальный детский технопарк

Минск, Беларусь

Аннотация. Проведены оптические расчеты, подобраны компоненты и представлен вариант конструкции лазерной технологической установки компактного исполнения, предназначенной для стимулирования роста семян редких видов растений в исследовательских лабораториях в малых сериях.

Ключевые слова: лазерный диод, оптическая система, расширитель пучка, семена растений.

LASER SYSTEM FOR STIMULATING THE GROWTH OF PLANT SEEDS

Gurman D.V.², Fiodartsau R.V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²National Children's Technology Park

Minsk, Belarus

Abstract. Optical calculations were performed, components were selected, and a design variant of a compact laser technological installation was presented, intended for stimulating the growth of seeds of rare plant species in research laboratories in small batches.

Keywords: laser diode, optical system, beam expander, plant seeds.

Адрес для переписки: Гурман Д. В., пр-т. Независимости 65, уч.к.17, г. Минск 220013, Республика Беларусь e-mail: psf-ltt@bntu.by

Лазерные установки для стимуляции роста семян растений представляют собой экологически чистые промышленные или лабораторные устройства, в качестве источника в которых используется лазерное излучение низкой интенсивности, воздействию которого на семена, приводит к повышению их всхожести, усилению роста и повышению стрессоустойчивости растений. Механизм воздействия лазера происходит на молекулярном уровне – активирует внутренние процессы в межклеточной жидкости и способствует более быстрому и качественному развитию растения, повышает урожайность на 20–30 %, а также устойчивость к неблагоприятным условиям.

В работах ряда авторов представлены результаты оценки эффективности воздействия лазерного излучения на семена растений [1–3].

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики лазерных промышленных установок.

данного результата связано с физическими свойствами глицерина: высокой плотностью и вязкостью.

Применение иммерсионной жидкости для компенсации дифракционных явлений в фотолитографии является простым и эффективным способом устранения интерференционных картин на кремниевой пластинке.

Литература

1. Mack, C. A. Field Guide to Optical Lithography / C. A. Mack. – 2nd ed. – Bellingham: SPIE Press, 2020. – 220 p.

2. Van Zant, P. Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing / P. Van Zant. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2021. – 784 p.

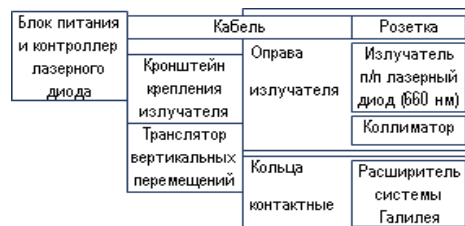


Рисунок 1 – Структурная блок-схема лазерной установки

В программном пакете Zemax OpticStudio проведен габаритный расчет оптической системы установки, основные геометрические параметры компонентов представлены в таблице 2. Технологическая лазерная установка имеет вертикальный вариант исполнения и построена на элементной базе компонентов компании Thorlabs, Inc. Проектирование и компоновку 3D изделия выполняли в CAD SolidWorks. Установка включает базовый элемент

конструкции – стойку с вертикальным линейным транслятором модели VAP10/M длиной хода 254 мм и ручной регулировкой расстояния посредством маховика. На подвижной платформе посредством двух монтажных колец SM2RC жестко закреплен расширитель пучка GBE15-A и кронштейн крепления излучателя, удерживающий оправу LD LTN330-A через контактное кольцо для тубусов SM05RC (рисунок 2).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика лазерных аппаратов для стимулирования роста семян

Модель / Наименование параметра	Аппарат квантовой терапии «Витязь», «АКТ-01»	Источник низкоинтенсивного когерентного излучения (НКИ) установка ЛОС-25А	Промышленная унифицированная лазерная установка "ЛУ-2; ЛУ-3"
Производитель	ЧТУП «Воркаут Групп»	НИИ генетики и селекции плодовых растений	ООО «НПФ Биолазер»
Длина волны, нм	650; 850	632,8	632,8
Диаметр пучка, м	0,01	0,1	н/д
Выходная мощность, мВт	5±2	100	н/д
Плотность мощности, Вт/м ²	0,01	3,185	н/д
Время экспозиции, мин	10 080	5, 10, 15	7 200

Внутри оправы размещаются розетка S7060R с лазерным диодом модели L660P120 (длина волны 660 нм, выходная мощность 120 мВт, посадочный диаметр 5,6 мм), зафиксированного резьбовым кольцом. Диод подключается к источнику питания через кабель SR9HF-DB9. Диод имеет исходные углы расходимости: $\theta_{\parallel} = 10^{\circ}$ (в вертикальной плоскости) и $\theta_{\perp} = 17^{\circ}$ (в горизонтальной плоскости). Поэтому с противоположной стороны в оправу по резьбе вкручивается втулка с асферической линзой (354330-A) для формирования коллимированного пучка диаметром 4 мм гауссовой формы продольного сечения. Диапазон подвижки асферической линзы находится в пределах 0...2,5 мм и обеспечивает подстройку оптимального фокусного расстояния $f' = 3,1$ мм.

Ахроматический галилеевский расширитель пучка представляет собой двухлинзовую систему и обеспечивает увеличение исходного значения диаметра с 4 мм до 60 мм ($\Gamma = 15\times$) (рисунок 3) [4].

Семена редких видов растений (ориентировочно 10 шт.) равномерно распределяются в центральной части алюминиевой чашки-кюветы Vochem (объемом 110 мл, $\varnothing 99 \times 25$ мм) и находятся на рабочем расстоянии $L=150$ мм от оптической поверхности расширителя пучка.

Небольшая мощность лазерного диода и продолжительное время непрерывной работы (до 24 часов) предусматривает необходимость подключения его к комбинированному контроллеру ИТС4001. Контроллер обеспечивает для лазерного

диода стабилизацию постоянного тока (СС) и постоянной мощности (СР), а также стабилизацию температуры 0,002 °С (24 часа).

Таблица 2 – Параметры оптических компонентов

№	R, мм	d, мм	Øсв., мм
1	~2,979 (асфер.)	–	3,84
2	–2,725	3,214	5,00
3	–13,57	3,10	5,77
4	∞	0,57	7,78
5	∞	182,75	46,50
6	–98,21	3,97	46,50

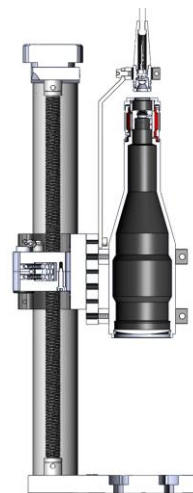


Рисунок 2 – 3D модель лазерной установки

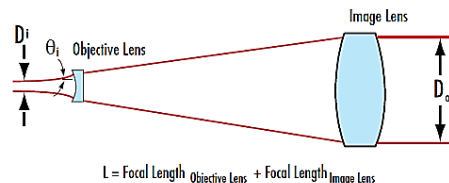


Рисунок 3 – Оптическая схема расширителя лазерного пучка

Заключение. Представленная модель лазерной технологической установки имеет компактное исполнение и предназначено для стимулирования роста семян редких видов растений в исследовательских лабораториях в малых сериях.

Литература

1. Пикереня, П. И. Влияние сочетанного лазерного облучения на начальные этапы онтогенеза пшеницы озимой / П. И. Пикереня, А. А. Дранкевич, В. А. Кравченко. – Мн.: ИВЦ Минфина, 2018. – 2 с.
2. Журба, П. С. Практика применения лазерных агротехнологий на Кубани / П. С. Журба // Фотоника. – 2014. – № 5(47). – С. 90–103.
3. Подвигина, О. А. Влияние лазерного облучения семян сахарной свеклы на продуктивность, технологическое качество и сохранность корнеплодов / О. А. Подвигина, Л. Н. Путилина, Н. А. Лазутина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2022. – № 3. – С. 44–52.
4. Устройство расширения лазерных пучков / Edmund Optics Inc. // InScience. – 2016–2025. – URL: <https://inscience.ru/science/post/ustrojstva-rasshireniya-lazernyh-puchkov> (дата обращения: 20.04.2025).

УДК 528.8.042

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОСТРОЧНОМ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ окружающего пространства

Гусаров И. Е., Калугин А. И., Антонов Е. А.

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Аннотация. В работе предложен метод оценки максимальной частоты следования лазерных импульсов для достижения необходимой степени заполнения сканируемого пространства. Проведен анализ зависимости степени заполнения области сканирования от частоты следования лазерных импульсов при различных значениях коэффициента перекрытия строк кадра. Показано, что для достижения степени заполнения близкой к единице существует возможность значительного снижения требуемой частоты следования импульсов за счет увеличения времени построения строк кадра.

Ключевые слова: вероятность обнаружения, лазерное сканирование, построчная траектория сканирования, степень заполнения пространства.

ESTIMATION OF THE MAXIMUM REPETITION RATE OF LASER PULSES DURING LINE-BY-LINE LASER SCANNING OF THE SURROUNDING SPACE

Gusarov I. E., Kalugin A. I., Antonov E. A.

Udmurt federal research center of the Ural branch of the Russian academy of sciences, Izhevsk, Russia

Abstract. The paper proposes a method for estimating the maximum repetition rate of laser pulses to achieve the required degree of filling of the scanned space. The dependence of the degree of filling of the scanning area on the repetition rate of laser pulses at different values of the overlap coefficient of the frame lines is analysed. It is shown that in order to achieve a fill rate close to unity, it is possible to significantly reduce the required pulse repetition rate by increasing the time for constructing frame lines.

Keywords: probability of detection, laser scanning, line-by-line scanning trajectory, degree of space filling

Адрес для переписки: Гусаров И. Е., ул. им. Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Российская Федерация
e-mail: gusarovie@udman.ru

При решении задачи об обнаружении некоторого объекта или группы объектов с помощью технологии лазерного сканирования вероятность правильного обнаружения цели можно считать ключевым параметром, говорящим об эффективности системы. Данная вероятность может быть выражена следующим образом:

$$W = W_1 \cdot W_2, \quad (1)$$

где W_1 – вероятность попадания лазерного излучения на объект поиска, W_2 – вероятность выделения полезного оптического сигнала на фоне шумов [1]. Вероятность W_1 зависит от количества сформированных лазерных пятен и их взаимного расположения в пространстве. Отсюда следует, что для достижения необходимой величины W_1 , частота следования импульсов используемого лазера должна быть достаточной для получения требуемого числа лазерных пятен.

В случае, когда интересующий нас объект неподвижен, данную вероятность можно представить следующим образом:

$$W_1 = 1 - (1 - Q)^n, \quad (2)$$

где Q – степень заполнения сканируемой области пространства, n – полное число кадров, сформированных за время поиска. Под степенью заполнения сканируемой области понимается величина, выражаемая как:

$$Q = \frac{S_f}{S_0}, \quad (3)$$

где S_f – площадь сформированного кадра, S_0 – площадь сканируемой области. Под площадью сформированного кадра будем понимать площадь фигуры, образованной набором лазерных пятен, полученных в процессе сканирования области пространства.

Для простоты примем, что центр пятна движется с постоянной скоростью, т.е. пятна внутри кадра расположены равномерно. Для расчета величины S_f требуется учесть площади области перекрытия лазерных пятен, показанных на рисунке 1.

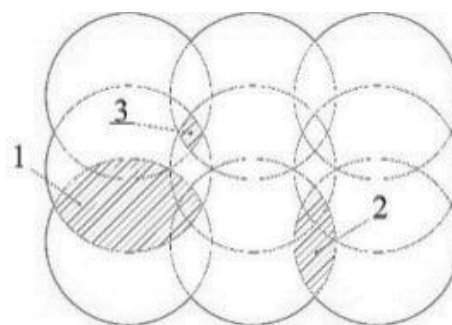


Рисунок 1 – области перекрытия пятен (1 – область перекрытия пятен в соседних строках, 2 – область перекрытия соседних пятен в строке, 3 – область перекрытия четырех пятен)

Интересующие нас области 1, 2 и 3 встречаются внутри формируемого кадра некоторое количество раз. Для расчета суммарных площадей областей 1, 2 и 3 получаем следующие уравнения:

$$S_1 = \begin{cases} 2w^2 N_y (N_x - 1) (\arccos(\eta_x) - \eta_x \sqrt{1 - \eta_x^2}), & 0 \leq \eta_x \leq 1; \\ 0, & \eta_x > 1 \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 2w^2 N_x (N_y - 1) (\arccos(\eta_y) - \eta_{str} \sqrt{1 - \eta_{str}^2}), & 0 \leq \eta_y \leq 1; \\ 0, & \eta_{str} > 1 \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 2w^2 (N_x + N_y - N_x N_y - 1) \left(2\eta_x \eta_{str} + \arctg\left(\sqrt{\frac{1}{\eta_{str}^2} - 1}\right) - \arctg\left(\frac{\eta_x}{\sqrt{1 - \eta_x^2}}\right) \right), & \sqrt{\eta_x^2 + \eta_{str}^2} < 1, \\ 0, & \sqrt{\eta_x^2 + \eta_{str}^2} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

где N_x и N_y – число пятен в строке и число строк соответственно, η_x и η_{str} – коэффициент перекрытия пятен в строке и коэффициент перекрытия строк соответственно, w – радиус лазерного пятна. Параметры N_x и N_y могут быть связаны с временными характеристиками формируемого кадра:

$$N_x = t_{str} \nu; N_y = \frac{t_f}{t_{str}}, \quad (5)$$

где t_{str} и t_f – время построения строки и время построения кадра соответственно, ν – частота следования лазерных импульсов. Коэффициенты перекрытия представляют собой отношение расстояния между центрами лазерных пятен вдоль соответствующего направления к диаметру пятна. Выражения для нахождения η_x и η_{str} можно записать в следующем виде:

$$\eta_x = \frac{L\theta}{2wN_x}; \eta_{str} = \frac{L\varphi}{2wN_y}, \quad (6)$$

где L – дистанция до сканируемой области, θ и φ – угловые размеры сканируемой области соответственно. Степень заполнения области пространства запишем в следующем виде:

$$Q = \frac{S_b - (S_1 + S_2 + S_3)}{S_0}, \quad (7)$$

где S_b – суммарная площадь всех пятен, составляющих кадр.

С помощью представленных в работе выражений получена зависимость величины Q от частоты ν при различных значениях η_{str} (рисунок 2). При проведении расчета было принято, что $t_f = 1$ с; $\theta = \varphi = 15^\circ$; $L = 1000$ м; $w = 1$ м.

При увеличении частоты следования лазерных импульсов величина параметра Q возрастает до некоторого максимального значения, которое зависит от плотности расположения строк в кадре,

т.е. коэффициента перекрытия η_{str} . При этом пороговое значение Q тем меньше, чем больше η_{str} , что обусловлено ростом площади не подсвеченных участков между пятнами. При этом пороговое значение степени заполнения снижается незначительно.

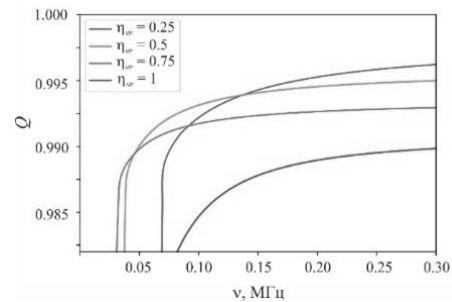


Рисунок 2 – График зависимости степени заполнения области сканирования от частоты следования лазерных импульсов

Для каждой кривой переход в область постоянных значений Q происходит после достижения некоторого значения ν . Отсюда следует, что при разработке лазерного сканирующего устройства существует возможность снижения требований к частоте импульсного лазерного источника при сохранении требуемой вероятности обнаружения объекта. Помимо этого, как видно из выражений (5) и (6) увеличение η_{str} приведет к увеличению времени построения строки и снижению требований к движущим элементам сканирующей системы.

Литература

1. Quentel, A. Analytic model for optimizing a long-range, pulsed LiDAR scanner for small object detection / A. Quentel, O. Maurice, X. Scatier // Applied Optics. – 2019. – Vol. 58, № 20. – P. 5496–5504.

УДК 535.312

УСТАНОВКА ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАЗЕРНОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Длугунович В. А., Исаевич А. В., Крейдич А. В., Круплевич Е. А.

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Описана метрологическая установка высокой точности для измерений коэффициентов отражения и оптических потерь высокоотражающих оптических элементов лазерной и оптоэлектронной техники. В уста-

новке используется метод внутрирезонаторного затухания. Она обеспечивает измерение коэффициентов отражения от 98,0000 % до 99,9995 % и оптических потерь от $5 \cdot 10^{-4}$ % до 2 % в спектральном диапазоне 450–2 000 нм оптических элементов диаметром от 12 до 55 мм при углах падения 0° и от 5° до 45° .

Ключевые слова: метрологическая установка, коэффициент отражения, оптические потери, высокоотражающие оптические элементы, метод внутрирезонаторного затухания.

HIGH ACCURACY FACILITY FOR MEASUREMENTS OF REFLECTANCE AND OPTICAL LOSSES OF HIGH REFLECTIVE OPTICAL COMPONENTS USED IN LASER AND OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY

Dlugunovich V. A., Isaevich A. V., Kreidich A. V., Kruplevich E. A.

Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. A high-precision metrological facility for reflectance and optical losses measurements of high reflective optical components used in laser and optoelectronic technology is described. The facility uses the cavity-ring-down method. It provides measurement of high reflectance from 98.0000 % to 99.9995 % and optical losses from $5 \cdot 10^{-4}$ % to 2 % in the spectral range from 450 nm to 2 000 nm of optical elements of laser and optoelectronic technology with a diameter from 12 mm to 55 mm at incidence angles of 0° and from 5° to 45° .

Keywords: metrological facility, reflectance, optical losses, high reflective optical components, cavity-ring-down method.

*Адрес для переписки: Круплевич Е. А., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by*

Эффективность применения изделий лазерной и оптоэлектронной техники обусловлена уровнем развития их метрологического обеспечения, поэтому актуальным является повышение точности и достоверности измерений параметров и характеристик как оптического излучения, так и оптических элементов, гармонизация с международными нормами требований к методам их определения, прогнозирование ресурса лазерной и оптоэлектронной техники.

В настоящее время в Республике Беларусь и в странах СНГ нет метрологических установок для измерений коэффициентов отражения и потерь высокоотражающих оптических элементов лазерных систем (зеркал, линз, пластин и т. д.). Поэтому создание испытательной базы для измерений коэффициентов отражения и оптических потерь высокоотражающих оптических элементов в соответствии с требованиями действующих международных стандартов является актуальной задачей.

Одним из эффективных и перспективных путей решения этой задачи является использование метода внутрирезонаторного затухания, который позволяет измерять суммарные потери оптических элементов, включая пропускание, поглощение и рассеяние излучения. Измерения осуществляются в соответствии с требованиями стандарта СТБ ISO 13142-2025 [1], который устанавливает процедуры измерений высоких значений (> 99 %) как коэффициентов отражения, так и пропускания оптических лазерных элементов с погрешностью измерения менее 0,01 %. Действие [1] распространяется на тестирование как плоских, так и вогнутых либо выпуклых высокоотражающих оптических элементов, используемых в лазерных системах и изделиях оптоэлектроники.

Метод внутрирезонаторного затухания основан на измерении времени затухания интенсивности лазерного излучения (ЛИ) в сферическом резонаторе. Импульс ЛИ вводится в резонатор,

образованный двумя вогнутыми высокоотражающими зеркалами, многократно отражается в нем, при этом небольшая часть излучения теряется при каждом отражении как за счет поглощения и рассеяния, так и за счет пропускания ЛИ зеркалами. Приемник излучения, помещенный после выходного зеркала резонатора, измеряет изменение во времени интенсивности выходящего ЛИ [1]. Время затухания интенсивности определяется как период времени, в течение которого интенсивность вышедшего из резонатора излучения уменьшается в e раз.

Для определения коэффициента отражения испытуемого образца необходимо измерить время затухания интенсивности ЛИ в резонаторе, поместить в этот резонатор испытуемый образец и вновь измерить время затухания интенсивности ЛИ в резонаторе с испытуемым образцом.

Коэффициент отражения R_S испытуемого образца рассчитывается по формуле [1]:

$$R_S = \exp\left(\frac{L_0}{c\tau_0} - \frac{L}{c\tau}\right) \quad (1)$$

где L_0 – длина исходного резонатора; L – длина резонатора с испытуемым образцом; τ_0 – время затухания интенсивности ЛИ на выходе из исходного резонатора; τ – время затухания интенсивности ЛИ на выходе из резонатора с испытуемым образцом; c – скорость света в среде внутри резонатора.

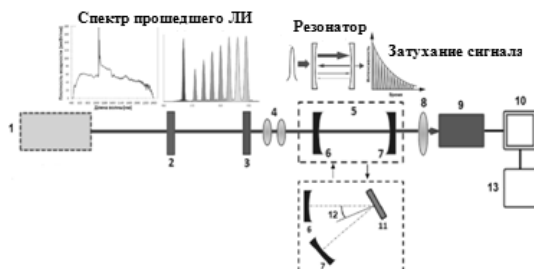
Оптические потери на поглощение, рассеяние и пропускание тестируемого оптического элемента на длине волны ЛИ определяются как [1]:

$$\alpha_e = 1 - R_S. \quad (2)$$

Блок-схема установки представлена на рисунке 1. Суперконтинуумный лазер I генерирует импульсное излучение в спектральной области от 400 до 2000 нм со средней мощностью 110 мВт.

Для выделения узкого спектрального интервала, излучение суперконтинуумного лазера I

подается на акустооптический перестраиваемый фильтр 2, состоящий из трех наборов кристаллов для спектральных диапазонов от 450 до 700 нм; от 640 до 1100 нм и от 1200 до 2000 нм. Число перестраиваемых полос для каждого спектрального диапазона составляет от 1 до 8 (для спектрального диапазона от 450 до 700 нм представлены полосы во врезке над акустооптическим перестраиваемым фильтром 2). Спектральная ширина полосы может изменяться от 0,5 до 19,8 нм.



1 – суперконтинуумный лазер; 2 – акустооптический перестраиваемый фильтр; 3 – поляризатор; 4 – коллимирующая оптическая система; 5 – исходный резонатор; 6 – входное зеркало; 7 – выходное зеркало; 8 – фокусирующая линза; 9 – фотоприемник; 10 – блок управления и обработки данных; 11 – тестируемый оптический элемент; 12 – угол падения излучения на тестируемый оптический элемент; 13 – компьютер

Рисунок 1 – Блок-схема БИ установки

Установка позволяет проводить измерения как для неполяризованного, так и для линейно поляризованного излучения. С помощью поляризатора 3 неполяризованное излучение, прошедшее через акустооптический перестраиваемый фильтр 2, преобразуется в излучение, линейно поляризованное в плоскости падения либо в ортогональной ей плоскости. С целью согласования мод оптическая система 4 фо-

кусирует пучок излучения в центр оптического резонатора. Излучение многократно проходит внутри резонатора (процесс изображен во врезке над элементом 5), ослабляется, и вышедшее излучение фокусируется с помощью линзы 8 на быстродействующий фотодетектор 9. Сигнал с фотодетектора 9 направляется в блок управления и обработки данных 10. Компьютер 13 производит расчет коэффициентов отражения и оптических потерь, управляет периферийными устройствами (лазером, акустооптическим перестраиваемым фильтром, поляризатором и т. д.) с помощью блока 10, позволяет инициировать и запускать процедуры испытаний, изменять или останавливать их при необходимости. Испытания проводятся в помещении, соответствующем классу чистых помещений 7 согласно ISO 14644-1 [2].

Проведенные исследования показали, что установка позволяет проводить измерения коэффициентов отражения в диапазоне от 98,0000 % до 99,9995 % и оптических потерь от $5 \cdot 10^{-4}$ % до 2 %. Относительная погрешность измерения высоких коэффициентов отражения ($R_s > 99,99$ %) в спектральном диапазоне от 450 до 2 000 нм не превышает 0,0002 %. Измерения можно проводить при углах падения излучения 0° и от 5° до 45° на оптические элементы лазерной и оптоэлектронной техники диаметром от 12 до 55 мм.

Литература

1. СТБ ISO 13142-2025. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Метод внутрирезонаторного затухания для измерений высоких коэффициентов отражения и пропускания. – Введ. 01.01.2025. – Мн.: Госстандарт, 2024. – 24 с.
2. ISO 14644-1:2015. Clean rooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. – 37 p.

УДК 681.782.473;

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

Довжик В. Г., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье проведен анализ перспективных технологий беспроводного оптического сопровождения (БОС) подвижных объектов. Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе данных систем, включая методы формирования и детектирования оптического сигнала, а также проблемы, связанные с распространением излучения в атмосфере. Особое внимание уделено методам компенсации атмосферных помех, таких как турбулентность, затухание и фоновые засветки. Проведено сравнение эффективности различных подходов к построению систем БОС: на основе пассивных и активных меток, а также безмаркерного сопровождения по контрастным признакам объекта. Сформулированы основные направления развития технологий БОС.

Ключевые слова: беспроводное оптическое сопровождение, оптическая связь, оптическое распознавание.

WIRELESS OPTICAL TRACKING SYSTEM

Dovzhik V. G., Kuznechik V. O.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This article analyzes promising technologies for wireless optical tracking (WOS) of moving objects. The physical principles underlying these systems are considered, including methods for generating and detecting optical signals, as well as issues related to atmospheric propagation. Particular attention is paid to methods for compensating for atmospheric interference, such as turbulence, attenuation, and background illumination. The

effectiveness of various approaches to constructing WOS systems is compared: those based on passive and active tags, as well as markerless tracking based on contrasting object features. The main areas of development for WOS technologies are outlined.

Keywords: wireless optical tracking, optical communication, optical recognition.

Адрес для переписки: Довжик В. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dovzhikvlad2000@gmail.com

Прием и передача информации может осуществляться по открытым (воздух, атмосфера, вода) и закрытым каналам (оптическое волокно) связи. Современные задачи в областях робототехники, беспилотной авиации, интеллектуальных транспортных систем и взаимодействия «человек–машина» остро нуждаются в высокоточных, надежных и помехозащищенных системах определения относительного положения и ориентации подвижных объектов. Радиочастотные системы, несмотря на свою распространенность, сталкиваются с проблемами электромагнитной совместимости, ограниченной полосой пропускания и потенциальной уязвимостью для перехвата и подавления.

Альтернативой выступают системы беспроводного оптического сопровождения (БОС), использующие для решения задач навигации и связи электромагнитное излучение оптического диапазона (видимого и ближнего инфракрасного). К их преимуществам относятся:

- Высокая точность и угловое разрешение, обусловленные малой длиной волны.
- Широкая полоса пропускания, позволяющая передавать большие объемы данных телеметрии и видео.
- Безопасность и защищенность от перехвата: оптический луч легко экранировать, а его узкая направленность затрудняет несанкционированный доступ.
- Отсутствие электромагнитных помех и необходимость лицензирования частот.

– Основными проблемы при проектировании систем БОС являются: зависимость от погодных условий (туман, дождь, снег), влияние атмосферной турбулентности, требование точного взаимного наведения приемопередающих апертур на начальном этапе и необходимость обработки больших потоков данных в реальном времени [1].

Применяется беспроводная связь и под водой [2]. Виды подводной связи представлены на рисунке 1.

Наиболее подробно остановимся на атмосферной БОС. БОС делятся на системы с активными метками и пассивные.

Системы с активными метками (beacon-based). На сопровождаемом объекте устанавливается источник оптического излучения (светодиодный или лазерный), положение которого отслеживается высокоскоростной позиционно-чувствительной камерой (PSD) или матричным фотоприемником. Данный подход обеспечивает высокую точность и помехозащищенность, но требует оснащения объекта активным оборудованием.

В системах с активной меткой задача сводится к обнаружению точечного источника на зашумленном фоне. Для решения данной задачи применяются следующие методы:

- Пространственная фильтрация для подавления фона.
- Пороговая обработка с адаптивным выбором порога. Алгоритмы кластеризации (например, k-means) для выделения группы пикселей, соответствующих метке.



Рисунок 1 – Основные виды подводной БОС

В пассивных системах используются более сложные методы компьютерного зрения: выделение признаков (SIFT, SURF, ORB), алгоритмы сегментации и детектирования объектов на основе сверхточных нейронных сетей (CNN).

После обнаружения метки или объекта вычисляются его угловые координаты относительно оптической оси приемника. Для прогнозирования положения в следующий момент времени и компенсации запаздывания системы применяются фильтры оценки состояния, наиболее распространенным из которых является фильтр Калмана [3]. Он позволяет оптимальным образом (в смысле минимума среднеквадратической ошибки) оценить состояние динамической системы (положение, скорость, ускорение) на основе ряда неточных измерений.

БОС может использоваться и в военных целях, например, во втором поколении ПТРК используется беспроводное сопровождение цели, основанное на системе управления, передачи сигналов оператору с помощью которых производится, посредством полуавтоматической системы, наведения по лучу лазера (рисунок 2). Наведение и управление ракеты идет за счет создания лазерного поля управления ракетой. Наводчик устанавливает ракету приблизительно в направлении цели, и совмещает прицельную марку с центром цели. После выстрела

производиться автоматический захват ракеты лазерным полем управления и ее выведение на линию визирования. В течение полетного времени траектория ракеты будет совмещена с линией визирования, при необходимости у наводчика есть возможность корректировать полет ракеты при движении цели. С помощью наземной аппаратуры происходит автоматическое сопровождение ракеты, предназначенное для наведения лазерного луча на фотоприемное устройство в течение времени полета ракеты. Работает с помощью видеокамеры, зеркал с сервоприводами, с помощью которых лазерное излучение наводится на ракету [4].

Следует отметить, что перспективным направлением модернизации ПТРК первого поколения является замена катушки с проводом для ее управления на беспроводную систему управления, включающую фотоприемник для принятия лазерного сигнала. Данная модернизация и последующее использование является экономически целесообразнее, чем применение ПТРК третьего поколения с автозахватом цели.

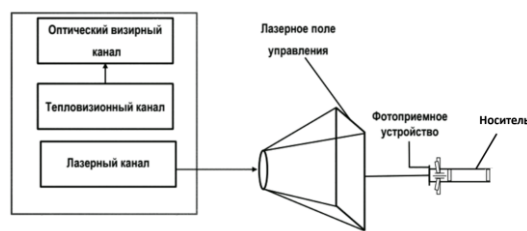


Рисунок 2 – Схема БОС

Литература

1. Кандидов, В. П. Волновые и флуктуационные явления в оптических линиях связи / В. П. Кандидов. – М.: Физматлит, 2018. – 352 с.
2. Обзор ключевых особенностей при построении подводной оптической беспроводной связи / И. И. Павлов [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 14–25.
3. Welch, G. An Introduction to the Kalman Filter / G. Welch, G. Bishop. – UNC-Chapel Hill, 2006. – 16 p.
4. Gappmair, W. Optical Satellite Links: Concepts and Applications / W. Gappmair. – Artech House, 2020. – 285 p.

УДК 535.33, 533.9, 543.423.1

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ И ТОНКИХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Ермалицкая К. Ф., Щерба У. К., Марковская А. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. При проведении элементарного анализа образцов с малыми концентрациями исследуемого вещества, например, покрытий и тонких слоев металлов, наиболее интенсивными в спектре оказываются резонансные линии, для которых характерно явление самопоглощения, выраженного в провале интенсивности спектрального пика. Провал спектрального пика делает невозможным определения точного значения концентрации образца. При уменьшении интенсивности возбуждающего излучения интенсивность резонансного пика падает до уровня шума. Предложена методика управления плотностью мощности лазерного излучения для уменьшения влияния явления самофокусировки. В качестве объекта исследования взят тонкий слой легкоплавкого галлия, нанесенный на тугоплавкую вольфрамовую подложку.

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, лазерная абляция, самопоглощение, управление плотностью мощности.

ELEMENTARY ANALYSIS OF COATINGS AND THIN LAYERS OF METALS BY DOUBLE PULSE LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY

Ermalitskaya K. F., Shcherba U. K., Markovskaya A. V.

Belarussian State University, Minsk, Belarus

Abstract. When conducting an elementary analysis of samples with low concentrations of the studied substance, for example, coatings and thin layers of metals, resonance lines are most intense in the spectrum, which are characterized by the phenomenon of self-ablation, expressed in a dip in the intensity of the spectral peak. The failure of the spectral peak makes it impossible to determine the exact concentration value of the sample. As the intensity of the exciting radiation decreases, the intensity of the resonant peak decreases to the noise level. A technique for controlling the power density of laser radiation is proposed to reduce the effect of the phenomenon of self-focusing. A thin layer of low-melting gallium deposited on a refractory tungsten substrate was taken as the object of the study.

Keywords: laser induced breakdown spectroscopy, laser ablation, self-absorption, power density control.

Адрес для переписки: Ермалицкая К. Ф., ул. Бобруйская, 5, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: ermalka@gmail.com

Цель исследования. Разработать метод проведения прямого микроанализа вещества с сильным влиянием самопоглощения.

Оборудование. Для реализации абляции и снятия спектров излучения использовался

ЛАЭМС спектрометр (рисунок 1). ЛАЭМС спектрометр – японо-белорусский спектрометр, диапазон измеряемых длин волн 190-800 нм, возбуждающий абляцию лазер – Nd:YAG, длина волны лазера 1064 нм.

Объект исследования. Объектом исследования является капля легкоплавкого галлия размером 2*3 мм, нанесенная на тугоплавкую вольфрамовую подложку. Для лучшего сцепления с подложкой капля была подвержена воздействию низких температур (жидкого азота) (рисунок 2).

Эксперимент. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (LIBS) – это метод сверхбыстрого элементарного анализа, основанный на явлении лазерной абляции поверхности образца. Два лазерных пучка сфокусированные в одну точку небольшой площади на поверхности образца возбуждают образование абляционной плазмы, датчики спектрометра считывают излучение образованной абляционной плазмы, строится график зависимости интенсивности излучения от его длины волны – спектр излучения. Каждый химический элемент имеет свой неизменный набор линий в спектре излучения. Зная это исследование полученных от различных образцов спектров излучение позволяет оценить их состав.

Существует два подхода при использовании данного метода – одноимпульсный и двухимпульсный. При одноимпульсном режиме лазерные импульсы двух лазеров падают одновременно на поверхность образца, при двухимпульсном режиме выходное отверстие одного из лазеров открывается с некоторой временной задержкой, установленной заранее исследователем. Энергия первого лазерного импульса возбуждает образование плазмы на поверхности образца, энергия второго идет на подогрев уже имеющейся плазмы. В нашей работы используется двухимпульсный режим так как варьирование величины межимпульсного временного интервала позволяет управлять процессами дополнительного возбуждения эмиссионной плазмы, что также корректирует влияние явления самопоглощения [1].



Рисунок 1 – ЛАЭМС спектрометр

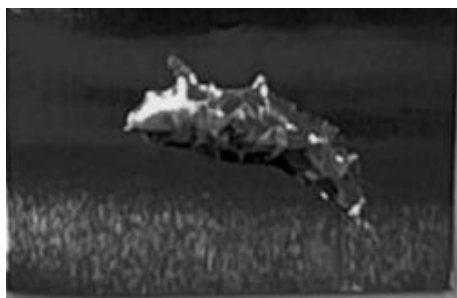


Рисунок 2 – Объект исследования

Экспериментально было получена возможность проведения элементарного анализа легкоплавкого галлия в атмосфере воздуха посредством использования методики лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Капля галлия была подвержена 20 двоекным лазерными импульсам энергией 55 мДж в одну точку, межимпульсный временной интервал составил 10 мкс. В полученном спектре галлия наблюдаются две интенсивные линии галлия с заметным провалом в центре, остальные линии галлия и линии вольфрама находятся на уровне шума (рисунок 3).

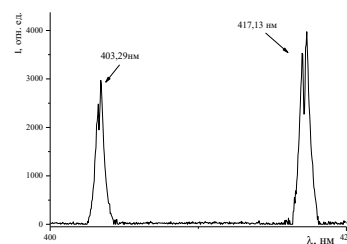


Рисунок 3 – Спектр капли галлия при стандартной фокусировке 1 мм

Провал в линиях делает невозможным определение истинного значения интенсивности и, следовательно, определения значения относительного содержания вещества.

Для корректировки формы линий нами предложен метод управления плотности мощности лазерного излучения: при уменьшении плотности мощности лазерного излучения влияние самопоглощения ослабевает. Лазерные лучи сфокусированы в пятно малой площади на поверхности образца, при увеличении площади пятна плотность мощности падает. Изменение площади пятна на поверхности образца может быть осуществлено посредством изменения расстояния между выходным отверстием лазера и предметным столиком (расфокусировке).

Первое измерение спектра капли галлия проводилось при сфокусированных лазерных лучах, расстояние между выходным отверстием лазерного излучения и предметным столиком составило 1 мм. При втором измерении расфокусировка составила 8 мм. Спектр снимался при тех же параметрах лазерного излучения. В полученном во втором измерении спектре наблюдается выравнивание интенсивных линий галлия, а также появление дополнительных линий галлия и вольфрама (рисунок 4).

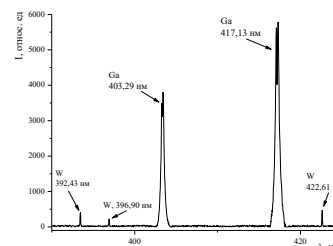


Рисунок 4 – Спектр капли галлия при стандартной фокусировке 8 мм

Вывод. Экспериментально была получена возможность элементарного анализа легкоплавкого галлия в атмосфере воздуха. Однако оценка относительного количества вещества оказывается невозможна так как в пиках интенсивности резонансных линий наблюдается провал, вызванный влиянием явления самопоглощения. Для корректировки полученных результатов была разработана методика управления плотностью мощности лазерного излучения. Получено, что при изменении расстояния между выходным отверстием лазера и предметным столиком спектрометра увеличивается площадь лазерного пятна на

поверхности образца. Увеличение площади лазерного пятна приводит к уменьшению плотности мощности лазерного излучения. При уменьшении плотности мощности влияние самопоглощения ослабевает, линии выравниваются, появляются линии галлия и вольфрама, ранее находившиеся на уровне шума.

Литература

1. Miziolek, A. W. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 620 p.

УДК 539.534.9:669

ПРИМЕНЕНИЕ SLM-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Есман Д. Ю.¹, Федорцев Р. В.¹, Сафонов В. В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются ключевые технологические проблемы при использовании технологии Selective Laser Melting (SLM) для изготовления корпусных деталей авиакосмических аппаратов. Выделены основные ограничения существующих SLM-систем: деформация тонкостенных деталей, усадка после термообработки, снижение качества при повторном использовании порошка, пористость, частое засорение фильтров и проблемы герметичности рабочей камеры, низкая скорость печати и риски, связанные с безопасностью работы с металлическими порошками. Предложены технологические решения для устранения указанных проблем, включая адаптивное сканирование, предварительный нагрев платформы, цифровая компенсация усадки, многолучевая лазерная архитектура и изменение толщины слоя в процессе печати, самоочищающиеся фильтры с вибрационной очисткой, композитное уплотнение камеры, оптимизация энергетической плотности и контроль дефектов.

Ключевые слова: аддитивное производство, авиакосмическая промышленность, корпусные детали, толщина слоя, пористость.

APPLICATION OF SLM TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURING OF BODY PARTS OF AEROSPACE VEHICLES

Yesman D. Y.¹, Fiodartsau R. V.¹, Safonov V. V.²

¹Belarusian National Technical University

²UE "NTC "LEMT" BelOMO"

Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers the key technological problems when using Selective Laser Melting (SLM) technology for the manufacture of body parts of aerospace vehicles. The main limitations of existing SLM systems are identified: deformation of thin-walled parts, shrinkage after heat treatment, reduced quality when reusing powder, porosity, frequent clogging of filters and problems with the tightness of the working chamber, low flow rate and risks associated with the safety of working with metal powders. Technological solutions have been proposed to address these issues, including adaptive scanning, platform preheating, digital shrinkage compensation, multi-beam laser architecture and layer thickness variation during printing, self-cleaning filters with vibration cleaning, composite chamber sealing, energy density optimization and defect control.

Keywords: additive manufacturing, aerospace industry, body parts, layer thickness, porosity.

Адрес для переписки: Есман Д. Ю., ул. Берута 17/128, г. Минск 220074, Республика Беларусь
e-mail: edaniil800@gmail.com

В условиях стремительного развития аэрокосмической отрасли возрастает потребность в легких, прочных и геометрически сложных корпусных деталях, способных выдерживать экстремальные нагрузки и температурные перепады. Технология селективного лазерного плавления (SLM) представляет собой перспективный

инструмент для производства таких компонентов, обеспечивая высокую степень конструкционной свободы и плотность материала. Однако при масштабировании процессов SLM для серийного изготовления корпусных элементов выявляется ряд критических ограничений [1]. Деформация тонкостенных элементов. При толщине стенок

менее 1 мм локальные температурные градиенты вызывают накопление остаточных напряжений и искривление деталей.

Возможные решения: предварительный подогрев платформы до 200–400 °С для снижения перепада температур; оптимизация конструкции поддержек с учетом зон концентрации напряжений, сканирование с изменяемой мощностью лазера и перекрестными штрихами для равномерного распределения тепла [2].

Усадка после термостабилизации. Многоступенчатая термообработка (отжиг, HIP) может приводить к линейной усадке до 0,5 %, что недопустимо при допуске $\pm 0,05$ мм.

Возможные решения: цифровая компенсация усадки, через корректировку размерной модели; изотермические режимы HIP (давление 100–150 МПа, температура до 900 °С) для равномерного снятия напряжений и выравнивания усадки по всему объему; плавные многозонные температурные циклы вместо одномоментного нагрева.

Повторное использование порошка. Многократное циклирование и просеивание приводит к накоплению оксидных включений и изменению распределения частиц, что ухудшает сплавление.

Возможные решения: ультразвуковая регенерация порошка с удалением адсорбированных оксидов; смешение свежего и регенерированного порошка в отношении не более 20 % «отработки» для сохранения стабильности параметров печати; внедрение контроля морфологии (лазерная дифракция) и отсева частиц превышающих размер 45 мкм.

Пористость готовых деталей. Неполное переплавление и нестабильный газовый поток могут давать пористость 0,1–1 % объема, что критично для герметичности корпусов.

Возможные решения: мониторинг пирометрами и высокоскоростными камерами с автоматической коррекцией мощности лазера; последующая HIP-обработка при давлении в 100 МПа для устранения оставшейся пористости; детальное исследование энергетической плотности на основе DOE-методики для каждой зоны детали [2].

Скорость печати. Однолучевые SLM-системы ограничены скоростью ~1 200 мм/с, что удлиняет время производства крупных корпусов до десятков часов.

Возможные решения: многолучевые волоконные лазеры (2–4 луча) и применение микроембранированных зеркальных сканеров с частотой управления более 50 кГц для параллелизма процессов; адаптивная толщина слоя (20–60 мкм) в зависимости от критичности геометрии масштабирования; модульная сборка крупногабаритных рам с объединенным контролем параметров сканирования.

Взрывоопасность порошков. Алюминиевые и магниевые сплавы образуют взрывоопасные взвеси при влажности более 1 % и механическом истирании.

Возможные решения: герметичная подача порошка с климат-контролем влажности; применение двойной системы фильтрации и инертизации (Ar/N_2) с автоматическим переключением; установка датчика концентрации взвешенных частиц и аварийная остановка процесса при достижении порога.

Засорение фильтров и герметичность камеры. Неплотности камер приводят к утечкам газа и засорению фильтров каждые 50–100 ч, что снижает качество продувки и печати.

Возможные решения: самоочищающиеся фильтры с обратным продувом и вибровоздействием; уплотнения из керамико-полимерных композитов, устойчивых к абразивному износу; непрерывный мониторинг перепада давления и автоматическая чистка без прерывания печати.

С целью внедрения SLM технологии в производство конструктивных элементов авиакосмических аппаратов, которые должны соответствовать высоким требованиям, актуальным является разработка новой SLM-системы, в которой будут решены существующих проблем. Разрабатываемая система имеет: активный зональный нагрев каждого сегмента слоя для равномерного управления температурами и снижения напряжений; многолучевую лазерную систему с гибридными керамическими приводами для динамического перераспределения мощности; интегрированный модуль ультразвуковой регенерации порошка без выноса из производственной ячейки; систему самоочищающихся фильтров с обратным потоком защитного газа и вибростимуляцией элементов; In situ контроль микроструктуры с нейросетевой корректировкой параметров для минимизации дефектов.

Разработка указанной установки позволит улучшить геометрические допуски, пористость менее и ускорит производство корпусных элементов. Интеграция adaptive-scan и active-heat модулей обеспечит минимальные остаточные напряжения без дополнительной термообработки. Перспективы включают масштабирование на фюзеляжи ракетных ступеней и соединение с автоматизированными сборочными линиями для модульного производства космических аппаратов.

Литература

1. Surface and property characterization of selective laser-melted Ti-6Al-4V alloy after laser polishing / J. Li [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 128, №. 1. – P. 703–714.
2. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V / A. M. Khorasani [et al.] // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 25. – P. 176–186.
3. Najmon, J. C. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. – 2019. – P. 7–31.

УДК 621.383

МЕТОДЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ИК ПРИЕМНИКОВ

Кирикович В. А., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Описаны, используемые в настоящее время, методы охлаждения ИК приемников и их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, ИК детектор, охлаждение.

IR DETECTOR COOLING METHODS

Kirykovich V. A., Kuznechik V. O.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The currently used methods of cooling IR receivers and their advantages and disadvantages are described.

Keywords: thermal imaging device, IR detector, cooling.

*Адрес для переписки: Кирикович В. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vyacheslavkirikovichlcp@bntu.by*

Хотя первые коммерческие тепловизоры появились в 1960-х годах, и с тех пор было сделано много улучшений с точки зрения автономности и портативности, что расширило сферу применения, фотонные ИК-детекторы по-прежнему должны работать при низких температурах и, следовательно, должны быть подключены к охлаждающему устройству. Это ограничение сохраняется и сегодня для достижения наилучшей чувствительности, лучшего разрешения, следовательно большей дальности обнаружения. В этой работе представлены классические методы охлаждения, используемые в тепловизионных приборах, указаны плюсы и минусы каждой системы.

Сначала следует отметить, что в настоящее время тепловизионные приборы делятся на охлаждаемые, работающие в диапазоне 3–5 мкм (MWIR), и неохлаждаемые тепловизоры, работающие в диапазоне 8–15 мкм (LWIR). Охлаждаемые тепловизоры обладают лучшей разрешающей способностью, большей чувствительностью. Однако охлаждаемые тепловизоры должны быть охлаждены до температуры, достаточно низкой для снижения темнового тока и теплового шума до уровня, при котором они больше не препятствуют отображению инфракрасного излучения. Такая низкая температура необходима для предотвращения тепловой генерации носителей заряда, которые являются переходами, паразитирующими на оптических носителях и делающими неохлаждаемые устройства очень «шумными». Неохлаждаемые тепловизоры менее подвержены воздействию темнового тока и теплового шума, что позволило решить проблему шумов несколькими способами:

- использование затворов в тепловизионных модулях;
- разделение тепловизионного модуля на части для снижения шумов возникающий от температуры рабочего модуля;
- использование новейших алгоритмов калибровку тепловизионного модуля.

Использование затворов является наиболее популярным методом охлаждения приемника. Принцип действия затвора сводится к перекрытию чувствительных элементов приемника на промежутки 1–3 секунд и проведению калибровки по лепесткам затвора. Недостатком данного метода является нецелесообразность использования затворов в приборах, применяемых при непрерывном наблюдении, невозможность использования в системах наведения и управления, а также случаи клина затворов, при котором перекрывалась не вся чувствительная площадка приемника, что в процессе калибровки приводило к нарушению целостности изображения.

Разделение тепловизионного модуля является менее популярным методом охлаждения в связи с усложняющейся конструкцией прибора, увеличением времени и усложнением процесса сборки и юстировки прибора.

Использование новых методов калибровки тепловизионных приборов показывает наилучшие результаты в улучшении качества изображения прибора и имеют наименьшее количество недостатков. Главным недостатком данного метода является сложность составления алгоритма калибровки модуля.

Как упоминалось ранее охлаждаемые тепловизоры необходимо применять при пониженных температурах чувствительного элемента. Поскольку предыдущие методы охлаждения не способны достичь низких температур история охлаждаемых тепловизоров началась с охлаждения жидким азотом, эталонной и исторически используемой температурой охлаждения ИК-детекторов является 77 К. Прогресс, достигнутый в разработке детекторов, теперь позволяет работать при более высоких температурах (до 150 К), что позволяет снизить требования к мощности охлаждения. По определению, термин «криогенное охлаждение» используется для охлаждения до температур ниже 200 К.

Диапазон температур охлаждения для ИК-приемников составляет примерно от 50 до 200 К,

в зависимости интересующего диапазона длин волн и требуемой чувствительности. В настоящее время для этих целей используются различные типы охладителей: машина Стирлинга, импульсные охладители, охладители Джоуля-Томсона, термоэлектрические охладители.

Машина Стирлинга является самым распространенным методом криогенного охлаждения. Принцип работы машины Стирлинга основан на работе двигателя, преобразующего тепловой поток в механическую энергию. Этот цикл обратим, и обратный цикл Стирлинга используется в холодильных установках, преобразующих механическую энергию в поток тепла. Недостатками данного метода является шумность охлаждающей системы и большое время выхода в рабочий режим.

Импульсные трубчатые охладители используют такой же компрессорный блок, как и в охладителе Стирлинга, чтобы создать давление. Главная разница заключается в том, что в импульсной трубке нет подвижных частей для перемещения рабочего газа между горячей и холодной сторонами. Геометрия самого устройства позволяет газу течь к холодной стороне сразу перед сбросом давления (эффект охлаждения). Данный охладитель обладает очень высокой надежностью и сроком службы. Сообщалось, что пульсирующие криохолодильники работают более 10 лет непрерывно без каких-либо потерь в производительности. Недостатками технологии является размер, вес и потребление мощности.

Охладители Джоуля-Томсона основаны на охлаждающем эффекте, возникающем при свободном расширении рабочего газа. Газ под высоким давлением поступает в тонкую трубку в криостате и принуждается проходить через откалиброванное отверстие на конце трубки. Охлажденный освобожденный газ возвращается к своему окружению, обмениваясь теплом через

стенку трубки с входящим газом. Входящий газ со временем становится все холоднее и холоднее, пока освобожденная жидкость не достигнет устойчивого состояния с фиксированной стабильной температурой: точкой кипения газа, соответствующей фактическому давлению газа в камере выпуска. Недостатком метода является необходимость регулировать расход газа, чтобы он соответствовал требуемой мощности охлаждения. Газ, используемый для охлаждения, должен быть чистым, так как наиболее частый режим отказа охладителя – это препятствие в газовом потоке, вызванное конденсатом примесей.

Работа термоэлектрических охладителей основана на эффекте Пельтье. Когда ток проходит через соединение двух полупроводниковых материалов, происходит либо поглощение тепла, либо его отведение в зависимости от направления тока. Данные охладители могут иметь миниатюрные габариты и стоят дешевле, чем любая другая система. Недостатком является температура охлаждения (нельзя использовать для охлаждения ниже 200 К).

Литература

1. Chrzanowski, K. Review of Thermal Imaging Technology / K. Chrzanowski. – Koczargi Nowe: 2024.
2. Chrzanowski, K. Testing surveillance thermal imagers under simulated real work condition / K. Chrzanowski // Opto-Electronics Review. – 2023. – Vol. 31, № 1.
3. Review on infrared imaging technology / F. Hou [et al.] // Sustainability. – 2022. – № 18. – Art. 11161.
4. Vollmer, M. Infrared thermal imaging / M. Vollmer // Computer Vision: A Reference Guide. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 666–670.
5. Paschotta, R. Thermal imaging / R. Paschotta // RP Photonics Encyclopedia. – 2024. – URL: https://www.rp-photonics.com/thermal_imaging.html (date of access: 20.02.2025).

УДК 539.216:621.3.049.75

МЕХАНИЗМ МИКРООБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ФОТОШАБЛОНАХ

Круковский В. А.^{1,2}, Федорцев Р. В.², Юдицкий В. А.¹, Воронцов А. И.¹

¹ОАО «ПЛАНАР»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Исследован механизм обработки тонких пленок на фотошаблонах с помощью коротких лазерных импульсов.

Ключевые слова: фотолитография, фотошаблон, абляция, обработка тонких пленок.

MECHANISM FOR PROCESSING THIN FILMS ON PHOTOMASKS

Krukouski V. A.^{1,2}, Fiodartsau R. V.², Yuditski V. A.¹, Vorontsov A. I.¹

¹JSC «PLANAR»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Annotation. The mechanism of processing thin films on photomasks using short laser pulses was investigated.

Keywords: photolithography, photomask, ablation, thin film processing.

Адрес для переписки: Круковский В. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: preferok@gmail.com

Изготовление фотошаблонов является одним из наиболее сложных процессов в микроэлектронике. От точности изготовления элементов фотошаблона зависит точность изготовления микросхем [1]. Технология производства фотошаблонов и оборудование для их нанесения и коррекции постоянно совершенствуются. Основная задача добиться снижения стоимости оборудования, сокращения времени изготовления и повысить качество фотошаблонов.

Компания SEMATECH относит ремонт фотошаблонов к лимитирующему фактору производства микрочипов следующего поколения. При современных литографических методах элементы на чипах обычно в четыре раза меньше элементов на фотошаблонах (4-х кратная литография), но из-за того, что элементы на кремниевой пластине становятся менее 100 нм, теперь уже становится сложно пропускать достаточное количество света через элементы фотошаблонов. Таким образом, приходится добавлять вспомогательные элементы для того, чтобы пропускать дополнительный свет и экспонировать микрочип. Эти вспомогательные элементы на фотошаблонах могут иметь такие же маленькие размеры, как и элементы кремниевой пластины, и таким образом необходимо развивать суб-100 нм технологии ремонта фотошаблонов.

На фотошаблонах, используемых в полупроводниковой литографии, обычно присутствуют дефекты, которые, в зависимости от их размера и расположения, могут сделать маску бесполезной. Так как топология современных фотошаблонов является очень сложной и, соответственно, дорогой в производстве, отбраковывать такие дефектные маски является экономически невыгодным. Поэтому крайне желательно ремонтировать такие дефектные фотошаблоны.

Процесс удаления дефектов должен соответствовать следующим критериям:

- а) нижележащий кварц (содовое стекло, Борское стекло) не должен быть поврежден;
- б) участки хрома вокруг зоны ремонта не должны ухудшаться в качестве и на них не должны попасть частички удаленного материала;
- в) на прозрачные участки фотошаблона вокруг зоны ремонта не должны внедряться частички удаленного материала;
- г) зона ремонта не должна быть термически повреждена;
- д) метод ремонта должен быть способным удалять наименьшие размеры на фотошаблоне.

До настоящего время фотошаблоны ремонтировались при помощи двух методов – использование лазерных систем и сфокусированного ионного луча, являющегося главной конкурирующей технологией суб-90 нм техпроцесса. Однако оба эти метода имеют недостатки.

Лазерные системы в свое время были лучшим способом ремонта фотошаблонов. Эти системы имеют множество преимуществ, включая высокую производительность, селективное удаление

материала на основе его отражательных свойств, а также не требует организации высокого вакуума. Однако для того, чтобы расплавить хром, установки с наносекундными лазерами проецируют пучок высокой интенсивности на дефект достаточно продолжительный интервал времени.

В течение этого времени происходит интенсивный обмен энергией между возбужденными лазером валентными электронами поглощающего материала и фононами кристаллической решетки (что выражается в прямом увеличении температуры поглощающего материала). В зоне оптического поглощения лазерного импульса (и возле нее) материал нагревается до его температуры испарения [2].

В результате этого происходит разбрызгивание небольших частичек материала. Так как процесс удаления сопровождается значительным нагреванием кристаллической решетки в течение относительно долгого периода времени (продолжительность импульса плюс время между импульсами), то вокруг зоны абляции возникает значительная зона термического влияния. Это сказывается на деформации краев элементов топологии и изменении однородности свойств материала. Кроме того, происходит диффузия металла в стеклянную кварцевую подложку фотошаблона, которая ограничивает пространственную разрешающую способность до 500 нм. Воздействие лазерного излучения с длительными импульсами на материал показано на рисунке 1.

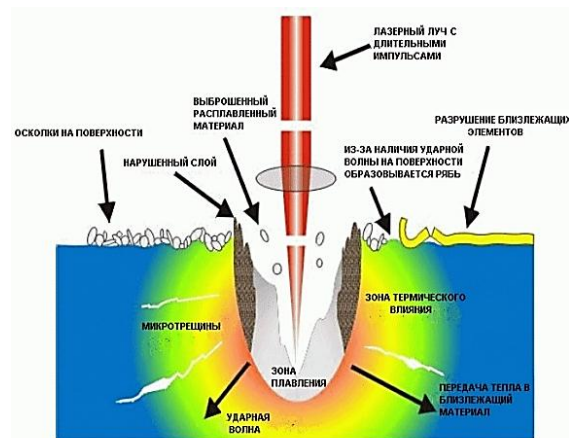


Рисунок 1 – Воздействие лазерного излучения с длительными импульсами на материал

Для решения этих термальных проблем для ремонта самых современных фотошаблонов стали использоваться ионные лучи, которые можно сфокусировать в пятно менее 25 нм. Ионные лучи уносят хром, пока он еще находится в твердом состоянии, посредством использования потока ионов галлия для распыления хромовых дефектов. Остатки хрома далее уносятся при помощи газа, протекающего над пластиной. Однако, если не отключить ионный луч точно в нужный момент, начинается диффузия галлия в кварц, из-за чего существенно уменьшается пропускание

кварца в зоне ремонта. Также можно перетравить стекло, в результате чего образуются питы (подрыв в стекле). Кроме того, так как маска является стеклянной, то существуют проблемы с точным наведением луча.

Сфокусированный ионный луч, требует частой трудоемкой наладки и калибровки по сравнению с использованием лазерных систем. Для достижения хорошей пространственной разрешающей способности, значение тока должно быть небольшим, что пропорционально замедляется и скорость ремонта.

Развитие технологии сверхкороткоимпульсных [2–4] лазеров и последующие исследования их воздействия на различные материалы дало резкий толчок для применения этих лазеров во многих новых и уникальных задачах в различных областях. Кроме уникальной возможности подвергать абляции практически любые твердые материалы, фемтосекундные лазеры используются в таких областях, как биомедицина, микрооптика, стекловолоконная оптика и телекоммуникации. Усовершенствование конструкции сверхбыстрых лазеров позволило эффективно использовать их и в промышленных задачах, в том числе и для ремонта фотошаблонов.

Использование ультракоротких световых импульсов является новым этапом и для ремонта фотошаблонов и предлагает множество преимуществ по сравнению с системами, использующими сфокусированные ионные лучи или лазеры с наносекундной или фемтосекундной длительностью. В число этих преимуществ входят высокие скорости удаления, разрешающая способность меньше размера сфокусированного пятна, минимальная редепозиция (переосаждение) удаленного материала и незначительная зона термического влияния.

Фемтосекундные лазеры позволяют точно производить микрообработку материала благодаря своим коротким (менее 10^{-13} секунды) импульсам. За такой короткий промежуток времени тепло от лазера не успевает уйти от места фокусировки в близлежащую зону, что улучшает качество конечного продукта. Для сравнения, наносекундные лазерные импульсы взрывают материал, разбрасывая микроскопические частички и образуя микроскопические волны в тех местах, где материал был расплавлен. При их более коротких и интенсивных импульсах фемтосекундные лазеры испаряют материал, что позволяет удалять выбранные слои хрома на фотошаблоне без влияния на оптическое пропускание диэлектрической подложки. Воздействие лазерного излучения с короткими импульсами на материал показано на рисунке 2.

Воздействие фемтосекундных импульсов имеет радикально отличные механизмы поглощения световой энергии и удаления материала (абляции) [2]. Механизмы взаимодействия энергии лазерных фотонов с материалом поглотителя проходят две различные фазы поглощения лазерных фотонов, что соответственно сказывается на

собственно абляции материала и удалении газообразных продуктов из околоповерхностной зоны фотошаблона (рисунок 3). Первоначально лазерный фотон поглощается электроном внешней оболочки материала поглотителя посредством, в порядке увеличения плотности энергии лазерного излучения, обратного Brehmesstrahlung [4], резонансного поглощения и мультифотонного поглощения.

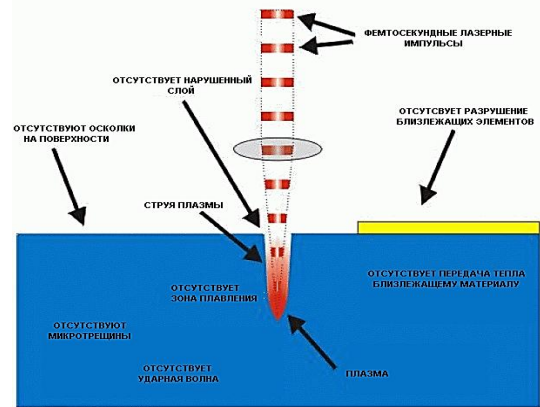


Рисунок 2 – Воздействие лазерного излучения с короткими импульсами на материал



Рисунок 3 – Схематическое представление последовательности лазерной абляции

В материалах с более диэлектрической природой (большая ширина запрещенной зоны), эти три механизма поглощения фотонов образуют свободные электроны, распространяющиеся в кристаллической решетке этих материалов. Эти свободные электроны придают материалам более металлические свойства, благодаря чему значительно увеличивается оптическая поглощательная способность материалов. Кроме того, эти свободные электроны могут ионизировать другие атомы. Таким образом, поглощенная энергия фотонов распространяется по кристаллической решетке посредством механизмов лавинной и мультифотонной ударной ионизации. Таким образом, в более диэлектрических материалах эти два явления становятся механизмами улучшенного поглощения фотонов и распространения энергии посредством ионизации. Последний вариант – мультифотонная ударная ионизация – наблюдается при более высоких плотностях энергии лазерного излучения и, как было обнаружено опытным путем, подвергает абляции чистые диэлектрики, так как для этого необходимо, чтобы связанный электрон внешней оболочки

поглотил два (или более) лазерных фотона в течение некоторого критического промежутка времени.

Материалы с металлическими свойствами, которые слабо коррелируют со оптической поглощательной способностью, потенциально могут показывать абсолютно другие механизмы поглощения фотонов и передачи энергии кристаллической решетке. Причиной этих отличий являются высокая плотность свободных электронов вместе с высокими мобильностью и плотностью состояний энергетических переходов. Эти свободные электроны легко поглощают одиночные фотоны с широким диапазоном энергий. Эта энергия легко передается ближайшим электронам проводимости, что увеличивает «электронную температуру». Электронная температура является аналогом обычной температуры, за исключением того, что она связана с энергетикой и передачей энергии среди электронов проводимости в противоположность вибрациям атомов в кристаллической решетке. Минимальный временной интервал взаимодействий, связанных с электронной температурой, также как и с механизмами ионизации, описанными для диэлектриков, составляет порядка десятков фемтосекунд. Высокоэнергетические электроны потенциально могут, при наличии достаточного времени, отдать свою энергию на нагрев кристаллической решетки, однако кинетика этого процесса зависит от параметров связи электрон-фонон, что в свою очередь связано с вероятностью такого взаимодействия. В большинстве материалов такие взаимодействия лежат в диапазоне пикосекундного интервала. Если можно создать достаточно высокую интенсивность электромагнитного поля, что обычно и происходит при фокусировании фемтосекундных лазерных импульсов, то считается, что эти высокоэнергетические взаимодействия имеют более высокую вероятность проявления. В результате удаление материала происходит до каких-либо термических взаимодействий с кристаллической решеткой. Именно потому, что энергия уходит из области удаления материала до того, как произойдет термическое нагревание кристаллической решетки, абляцию посредством фемтосекундных лазеров часто называют «холодной абляцией».

После того, как лазерный фотон поглощен, и его энергия перешла в близлежащую кристаллическую решетку, могут начаться процессы, которые ведут к удалению материала (абляции). На данный момент существуют две теории механизма абляции, одна из которых – это термальное испарение (сильная абляция), а другая – кулоновский взрыв (легкая абляция). При термальной абляции значительная часть энергии фотонов расходуется на нагревание кристаллической решетки, в результате чего некоторая часть материала достигает своей температуры испарения. Кулоновский взрыв происходит, когда механизмы распространения энергии посредством ионизирующих электронов (лавинная, многофотонная ударная ионизация и т. д.) положительно

заряжают ближайшие атомы кристаллической решетки. Как только достигается критическая сила отталкивания электрического поля, ионизированные атомы начинают быстро разлетаться друг от друга, унося с собой большую часть энергии лазерных фотонов.

Баланс между этими двумя механизмами задается электронной структурой удаляемого материала, интенсивностью лазерного излучения и количеством импульсов, участвующих в процессе абляции. Для диэлектрических материалов с широкой запрещенной зоной вероятность кулоновского взрыва больше, чем для металлических материалов. Основопологающей причиной этого является большая подвижность электронов в металлах, которая, возможно, из-за механизмов экранирования электронов препятствует ионизации. Увеличивая интенсивность лазерного излучения для усиления механизмов мультифотонной ионизации, можно перевесить чашу весов в сторону термальной абляции. Некоторые различия между этими двумя механизмами можно увидеть опытным путем, если рассмотреть в микроскоп убранные абляцией зоны. При термической абляции глубина удаленного поглотителя составляет несколько субмикрон за импульс, а поверхность является довольно шероховатой. При удалении посредством кулоновского взрыва, глубина удаляемого материала составляет несколько десятков нанометров за импульс, поверхность является гладкой, а размеры убиремого материала в плоскости x – y можно контролировать с точностью до нанометров.

После анализа преимуществ и недостатков, описанных выше методов исправления дефектов, было принято решение применять лазерное устранение тонких пленок на фотошаблонах с помощью импульсных лазеров, со следующими техническими характеристиками: длина волны $\lambda = 514$ нм, энергия импульса $E \approx 100$ мкДж, длительность импульса < 300 фс, частота следования импульсов кГц диапазона.

Лазерный метод устранения дефектов успешно применяется ОАО «ПЛАНАР» в установках типа ЭМ-5001В и ЭМ-5131, производимых на предприятии.

Литература

1. Лысенко, А. В. Контроль фотошаблонов с использованием цифровых методов / А. В. Лысенко, Д. М. Никулин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2022. – Т. 6. – С. 134–142.
2. Bovatsek, J. Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials / J. Bovatsek [et al.] // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518, №. 10. – P. 2897–2904.
3. Либенсон, М. Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина; под общ. ред. В. П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
4. Вейко, В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка / В. П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 110 с.

УДК 621.384.3:621.391

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ ТЕЛЕВИЗИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКЕ

Кунцевич Б. Ф., Бушук С. Б.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. Предложена модель формирования пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсными телевизионно-измерительными системами видения для случая, когда подсветка осуществляется одновременно двумя лазерными импульсами. При этом неподвижный объект наблюдается путем изменения расстояния задержки. Получены аналитические выражения для характерных расстояний зоны видимости, которые определяются длительностями импульсов лазерной подсветки и временем экспозиции фотоприемника, а также расстоянием до объекта наблюдения. Численные расчеты подтвердили справедливость полученных аналитических выражений.

Ключевые слова: активно-импульсная телевизионно-измерительная система видения, двухимпульсная лазерная подсветка, пространственно-энергетический профиль, характерные расстояния зоны видимости.

REGULARITIES OF FORMATION OF THE VISIBILITY ZONE BY ACTIVE-PULSE TELEVISION-MEASURING VISION SYSTEMS WITH TWO-PULSE LASER ILLUMINATION

Kuntsevich B. F., Bushuk S. B.

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

Abstract. A model is proposed for forming the spatial-energy profile of the visibility zone by active-pulse television-measuring vision systems for the case when illumination is carried out simultaneously by two laser pulses. In this case, a stationary object is observed by changing the delay distance. Analytical expressions are obtained for the characteristic distances of the visibility zone, which are determined by the duration of the laser illumination pulses and the exposure time of the photodetector, as well as the distance to the observation object. Numerical calculations confirmed the validity of the obtained analytical expressions.

Keywords: active-pulse television-measuring vision system, two-pulse laser illumination, spatial-energy profile, characteristic distances of the visibility zone.

Адрес для переписки: Кунцевич Б. Ф., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: boris_kuntsevich@mail.ru

В настоящее время имеется много публикаций, посвященных разработке простых и надежных способов получения трехмерных (3D) изображений (карт глубин) области наблюдения с помощью активно-импульсных телевизионно-измерительных систем видения (3D-АИТИСВ) [1]. В этом случае дополнительно вычисляются расстояния до «элементов» поверхности, соответствующих каждому пикселю обычного двумерного изображения видеокамер. Кратко принцип работы АИТИСВ можно сформулировать следующим образом. Наблюдаемая область пространства освещается периодически повторяющимися лазерными импульсами, длительность которых $\Delta t_{\text{лаз}}$ значительно меньше времени распространения света до зоны наблюдения и обратно. В приемном блоке в качестве быстродействующего затвора и усилителя принимаемого отраженного светового излучения обычно используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который синхронно включается с лазерными импульсами на время $\Delta t_{\text{фп}}$ (строб-импульс фотоприемника), обычно сравнимое с $\Delta t_{\text{лаз}}$. Регулировка времени задержки $\Delta t_{\text{зад}}$ между началами импульсов подсветки и стробирования изменяет расстояние до зоны наблюдения. АИТИСВ позволяют наблюдать объекты в сравнительно узком слое пространства, называемом зоной видимости (ЗВ).

Известные 3D-АИТИСВ обладают определенными недостатками. Поэтому недавно в [2] был предложен новый способ получения карт глубин, когда подсветка осуществляется одновременно двумя лазерными импульсами с длительностями $\Delta t_{\text{лаз1}}$ и $\Delta t_{\text{лаз2}}$, которые разделены интервалом времени $\Delta t_{\text{лаз0}}$, причем $\Delta t_{\text{лаз}} = \Delta t_{\text{лаз1}} + \Delta t_{\text{лаз0}} + \Delta t_{\text{лаз2}} \leq \Delta t_{\text{фп}}$. Однако полученные авторами результаты ограничены случаем, когда $\Delta t_{\text{лаз1}} + \Delta t_{\text{лаз2}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$. Указанное неравенство по техническим причинам на практике часто не выполняется.

В настоящей работе с использованием подхода, предложенного в [3], впервые получены аналитические выражения для характерных расстояний пространственно-энергетического профиля (ПЭП) сигнала, когда $\Delta t_{\text{лаз}} \leq \Delta t_{\text{фп}}$ (включая случай $\Delta t_{\text{лаз1}} + \Delta t_{\text{лаз2}} \ll \Delta t_{\text{фп}}$). Исследование ограничено неподвижным относительно АИТИСВ объектом. В этом случае ПЭП представляет зависимость величины регистрируемого системой сигнала E от расстояния задержки $S_{\text{зад}} = c\Delta t_{\text{зад}}/2$, где c – скорость света. На рисунке 1 для иллюстрации приведен вычисленный ПЭП зоны видимости для параметров, указанных в подписи к рисунку. Отметим, что коэффициенты β_1 и β_2 обозначают в относительных единицах амплитуды интенсивности первого и второго лазерных импульсов подсветки. При вычислении ПЭП регистрируемого сигнала $E(S_{\text{зад}})$ за основу бралось выражение [4]:

$$E = E_0 S_{об}^{-2} \exp(-2\alpha S_{об}) [L(t - 2S_{об}/c) G(t - \Delta t_{зад}) dt,$$

где $S_{об}$ – расстояние до объекта наблюдения; E_0 – величина, не зависящая от расстояния S ; α – показатель ослабления лазерного излучения в атмосфере; t – время; L и G – функции, описывающие временные зависимости интенсивности излучения лазерной подсветки и чувствительности приемного блока (коэффициента усиления яркости ЭОП). Указанное выражение модифицировалось таким образом, который позволяет учесть наличие двух импульсов подсветки. Для простоты задавалась прямоугольная форма импульсов подсветки и стробирования. Предполагается, что обнаружение, распознавание и идентификация неподвижного объекта осуществляется путем изменения расстояния задержки $S_{зад} = c\Delta t_{зад}/2$.

Из рисунка 1 следует, что принципиальным отличием двухимпульсной лазерной подсветки является наличие трех платообразных участков (плато 1, плато 2 и плато 3) на ПЭП. Известно, что при одноимпульсной подсветке присутствует один платообразный участок. Кроме того, из рисунка 1 и используемой модели формирования ПЭП следует, что $E_2 = E_1 + E_3$. Здесь E_i – энергия, соответствующая i -му плато. Кроме того, расстояние до объекта $S_{об}$ совпадает с окончанием плато 2 (точка 5 на рисунке 1).

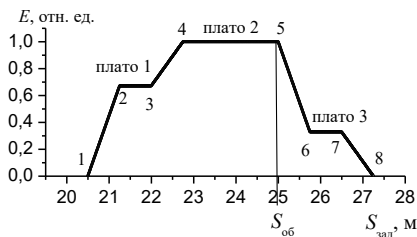


Рисунок 1 – Зависимость величины регистрируемого сигнала E от расстояния $S_{зад}$: $\Delta t_{лаз1} = 5$ нс; $\Delta t_{лаз0} = 5$ нс; $\Delta t_{лаз2} = 5$ нс; $\Delta t_{фп} = 30$ нс; $S_{об} = 25$ м; $\beta_1 = 1$; $\beta_2 = 0,5$

Приведем полученные аналитические выражения для характерных расстояний зоны видимости и их численные значения, соответствующие рисунку 1: $S_{нач} = S_{об} - c\Delta t_{фп}/2 = 20,5$ м и $S_{кон} = S_{об} +$

$c\Delta t_{лаз}/2 = 27,2$ м – начальная и конечная точки зоны видимости; $S_{пл1-нач} = S_{об} - c(\Delta t_{фп} - \Delta t_{лаз1})/2 = 21,2$ м и $S_{пл1-кон} = S_{об} - c(\Delta t_{фп} - \Delta t_{лаз1} - \Delta t_{лаз0})/2 = 22,0$ м – начальная и конечная точки плато 1; $S_{пл2-нач} = S_{об} - c(\Delta t_{фп} - \Delta t_{лаз})/2 = 22,7$ м и $S_{пл2-кон} = S_{об} = 25,0$ м – начальная и конечная точки плато 2; $S_{пл3-нач} = S_{об} + c\Delta t_{лаз1}/2 = 25,8$ м и $S_{пл3-кон} = S_{об} + c(\Delta t_{лаз1} - \Delta t_{лаз0})/2 = 26,5$ м – начальная и конечная точки плато 3. На основании этих данных можно вычислить длины следующих участков: $\Delta S_{фр1} = c\Delta t_{л1}/2 = 0,8$ м – длина фронта 1 (на рисунке 1 расстояние между проекциями точек перегиба 1 и 2 на ось абсцисс); $\Delta S_{фр2} = c\Delta t_{л2}/2 = 0,8$ м – длина фронта 2 (расстояние между проекциями точек 3 и 4); $\Delta S_{сп2} = c\Delta t_{л1}/2 = 0,8$ м – длина спада 2 (расстояние между проекциями точек 5 и 6); $\Delta S_{сп3} = c\Delta t_{л2}/2 = 0,8$ м – длина спада 2 (расстояние между проекциями точек 7 и 8). Длина ЗВ $\Delta S_{ЗВ} = S_{кон} - S_{нач} = c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп})/2 = 6,7$ м. Анализ показывает, что соответствующие вычисленные значения (рисунок 1) и значения, полученные с использованием аналитических выражений, совпадают.

Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации экспериментальных зависимостей, а также для целенаправленного выбора оптимальных параметров системы.

Литература

1. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами / А. К. Мовчан, В. В. Капустин, М. И. Курачий, Е. С. Чалдина // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 7–14.
2. Single-shot double-pulse range-gated 3D imaging / J. Sun [et al.] // Chinese Optics Letters. – 2025. – № 3. – Art. 031101.
3. Закономерности формирования зоны видимости активно-импульсными телевизионными системами при значительном различии длительностей импульсов подсветки и экспозиции фотоприемника / Б. Ф. Кунцевич [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2025. – № 1. – С. 30–46.
4. Кунцевич, Б. Ф. Сравнение пространственно-энергетических профилей зон видимости активно-импульсных систем видения для двух способов наблюдения / Б. Ф. Кунцевич, И. Н. Пучковский, С. С. Шавель // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – № 3. – С. 793–802.

УДК 681

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ: ЗАМЕНА ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ 2,5 Вт НА АБСОЛЮТНЫЕ ЭНКОДЕРЫ С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Книга И. В.^{1,2}, Маляревич А. М.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Беларусь

Аннотация. Многие системы позиционирования, которые широко используются на промышленных предприятиях, построены на основе применения вращающихся трансформаторов, работающих по аналоговому принципу. Предлагается и обосновывается целесообразность замены указанных аналоговых датчиков на энкодеры с последовательным синхронным интерфейсом SSI.

Ключевые слова: системы позиционирования, преобразователь типа RDC, энкодер с последовательным синхронным интерфейсом.

POSITIONING SYSTEM UPGRADE: REPLACEMENT OF 2.5W ROTARY TRANSFORMERS WITH ABSOLUTE ENCODERS having A DIGITAL INTERFACE

Kniha I. V.^{1,2}, Malyarevich A. M.¹

¹Belarusian National Technical University

²OSJC «Peleng»

Minsk, Belarus

Abstract. Many positioning systems that are widely used in industrial enterprises are based on use of rotating transformers that operate on an analog principle. It is proposed and justified that these analog sensors can be replaced with encoders having SSI serial synchronous interface.

Keywords: positioning systems, RDC-type converter, encoder with a serial synchronous interface.

Адрес для переписки: Малеяревич А. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь.

e-mail: malyar@bntu.by

На многих промышленных предприятиях эксплуатируется устаревшее оборудование, системы позиционирования которого построены на основе вращающихся трансформаторов (ВТ), таких как 2,5 Вт. Несмотря на свою надежность и аналоговую точность, данные датчики требуют использования дорогостоящих и сложных преобразователей RDC (Resolver-to-Digital Converter) – устройство, непрерывно считывающее сигналы от ВТ и, вычисляя на их основе угол поворота, преобразует его в цифровой код. Однако эти устройства имеют ограниченное разрешение и создают сложности при интеграции в современные системы цифрового управления. Их замена на современные цифровые аналоги является ключевой задачей для повышения эффективности производства.

В работе проведен анализ существующей системы на основе ВТ 2,5 Вт. Выполнено моделирование работы системы с использованием абсолютного энкодера с последовательным синхронным интерфейсом SSI (цифровой протокол для передачи данных). Проведена оценка стоимости владения, включающая стоимость самого датчика и модуля сопряжения RDC для ВТ, в сравнении с системой на основе энкодера с SSI для программируемого логического контроллера (ПЛК), а также затраты на монтаж и настройку обеих систем.

Несмотря на высокую надежность, устойчивость к перегрузкам и способность работать в сложных условиях, системы на основе ВТ требуют применения дорогостоящего преобразователя RDC. Аналоговый сигнал ВТ подвержен искажениям от электромагнитных помех, а также имеет набегающую ошибку измерений за полный оборот (360°). При переходе на энкодеры удается избавиться от набегающей ошибки, повысить скорость и точность получения данных без изменения внешних габаритов прибора, что открывает перспективу для его дальнейшего уменьшения.

Модуль с интерфейсом SSI может вносить искажения в выходной сигнал преимущественно из-за некорректной установки либо его самого, либо датчика (энкодера). Традиционная система на основе ВТ 2,5 Вт при искажении аналогового сигнала на 0,1 В из-за помехи приведет к прямой ошибке в несколько градусов, которую устройство позиционирования может даже не заметить.

На рисунке 1 представлена визуализация конструкции датчика угла для приборов наблюдения, который оснащен вращающимся трансформатором 2,5 Вт.

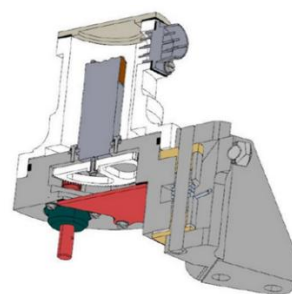


Рисунок 1 – Конструкция датчика угла для приборов наблюдения, которая оснащена вращающимся трансформатором 2,5 Вт

На рисунке 2 представлена визуализация конструкции датчика угла для приборов наблюдения, которая оснащена энкодером.

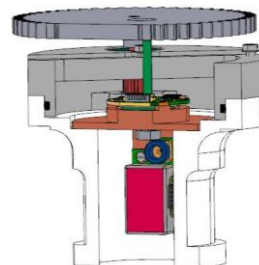


Рисунок 2 – Конструкция датчика угла для приборов наблюдения, которая оснащена энкодером

Таким образом, замена вращающихся трансформаторов 2,5 Вт на абсолютные энкодеры является экономически и технически обоснованной. Основной выгодой является не столько замена самого датчика, сколько отказ от дорогостоящей и морально устаревшей аппаратуры преобразования сигнала (RDC). Модернизация позволяет:

- повысить точность и надежность системы позиционирования;
- снизить совокупную стоимость владения за счет упрощения аппаратной части;
- интегрировать устаревшее оборудование в современные системы управления по цифровым протоколам.

УДК 621.373.826

КРИСТАЛЛ $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ КАК АКТИВНАЯ СРЕДА
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Лазарчук А. И., Кисель В. Э.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе сообщается о исследовании кристалла $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ (Yb:GYSO) как активной среды для фемтосекундных лазеров с диодной накачкой. Режим пассивной синхронизации мод в лазере на кристалле Yb:GYSO с использованием полупроводникового насыщающегося зеркала (SESAM) был исследован для поляризации выходного излучения параллельного оси оптической индикатрисы N_g . Минимальная длительность, полученная для поляризации $E//N_g$ равнялась 77 фс на длине волны 1054.3 нм с частотой следования импульсов 82 МГц. Проведено детальное исследование выходных характеристик фемтосекундного лазера с поляризацией выходного излучения $E//N_g$.

Ключевые слова: кристаллы оксиортосиликата, иттербий, фемтосекундный лазер, синхронизация мод.

YB:GD_{1.615}Y_{0.385}SIO₅ CRYSTAL AS A GAIN MEDIA FOR
FEMTOSECOND LASERS

Lazarchuk A.I., Kisel V.E.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This work reports on investigations of $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ (Yb:GYSO) crystal as a gain media for diode-pumped femtosecond lasers. Passive mode-locking of the Yb:GYSO laser using a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) was investigated for output radiation polarized parallel to the principal optical axis N_g . A minimum pulse duration of 77 fs was achieved for the $E//N_g$ polarization at a wavelength of 1054.3 nm with a pulse repetition rate of 82 MHz. A detailed investigation of the output characteristics of the femtosecond laser with $E//N_g$ output polarization was carried out.

Keywords: oxyorthosilicate crystals, ytterbium, femtosecond laser, mode-locked.

Адрес для переписки: Лазарчук А. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lazarchuka@bntu.by

Кристаллы, легированные ионами Yb^{3+} обладают уникальными свойствами для использования в качестве активных сред фемтосекундных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне вблизи 1 мкм. Простая двухуровневая структура уровней энергии кристаллов с ионами Yb^{3+} , приводит к устранению потерь на ап-конверсию, кросс-релаксацию и поглощение из возбужденном состоянии. Другим преимуществом ионов иттербия является низкий квантовый дефект, что минимизирует тепловыделение внутри активного элемента. Также кристаллы с ионами Yb^{3+} обладают более широкой полосой усиления по сравнению с материалами, легированными неодимом (Nd), что делает их более привлекательными для использования в фемтосекундных лазерах. Важным преимуществом является совпадение полос поглощения иттербия в диапазоне 980 нм с излучением мощных InGaAs-диодных лазеров [1].

Легированные ионами иттербия кристаллы оксиортосиликатов такие как $\text{Yb:Y}_2\text{SiO}_5$ (Yb:YSO), $\text{Yb:Lu}_2\text{SiO}_5$ (Yb:LSO), $\text{Yb:Sc}_2\text{SiO}_5$ (Yb:SSO), $\text{Yb:Gd}_2\text{SiO}_5$ (Yb:GSO) и их соединения типа Yb:LYSO и Yb:GYSO характеризуются сильными кристаллическими полями, что приводит к относительно большому штарковскому расщеплению нижнего мультиплета $^2F_{7/2}$ [2]. В результате это приводит к снижению порога генерации лазера, а спектр сечений стимулированного излучения имеет широкую полосу, что делает эти материалы

особенно привлекательными для генерации фемтосекундных импульсов. Эти свойства делают кристаллы оксиортосиликатов перспективными активными средами для создания фемтосекундных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне около 1 мкм.

В этой работе мы сообщаем о исследовании выходных характеристик фемтосекундного лазера на основе кристалла $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ с поляризацией выходного излучения $E//N_g$.

Резонатор для работы фемтосекундного построен по четырехзеркальной схеме (рисунок 1). Он состоит из двух изогнутых зеркал M1 и M2 ($R = 100$ мм), плоского выходного зеркала OC и SESAM для получения режима пассивной синхронизации мод.

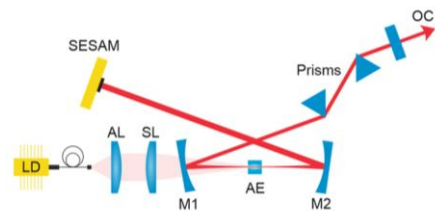


Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла Yb:GYSO

Компенсация дисперсии групповой задержки (ДГЗ) была реализована с помощью пары дисперсионных призм SF10. Оптимальное разделение

призм составляло около 355 мм от острия к острю, что соответствует максимальному значению ДГЗ около -3200 фс². Расчетный диаметр TEM₀₀ моды в кристалле составил около 35 мкм. Источником накачки служил одномодовый InGaAs лазерный диод с волоконным выводом, с максимальной выходной мощностью 600 мВт на длине волны около 976 нм. Длина волны излучения накачки стабилизировалась волоконной брэгговской решеткой. Выходное излучение диода накачки имело линейную поляризацию, состояние которой подстраивалось для максимального поглощения в активном элементе. Пятно излучения накачки диаметром около 35 мкм формировалось в активном элементе с помощью оптической системы, состоящей из асферической линзы (АЛ) с фокусным расстоянием 18,4 мм и сферической линзы (СЛ) с фокусным расстоянием 100 мм.

Активные элементы кристаллов Yb³⁺(4,6 ат. %):Gd_{1,615}Y_{0,385}SiO₅ толщиной 2 мм и апертурой $8 \times 1,2$ мм² были вырезаны вдоль оси оптической индикатрисы N_p для возможности получения генерации с поляризацией $E//N_g$. Обе боковые грани размером 8×2 мм² поддерживались при комнатной температуре с помощью медных пластин (для улучшения теплового контакта использовалась индиевая фольга) и термоэлектрический регулятор, в то время как рабочие грани размером $8 \times 1,2$ мм² имели просветляющее покрытие на длинах волн накачки и генерации лазерного излучения.

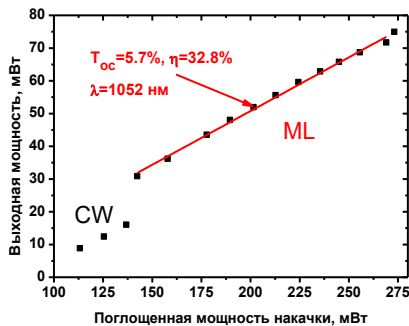


Рисунок 2 – Выходная характеристика Yb:GYSO лазера с поляризацией выходного излучения $E//N_g$

Был исследован лазер с ПСМ и выходными зеркалами с коэффициентами пропускания 1,5 %, 3,5 %, 5,7 % и 10 %. Стабильная режим ПСМ был получен на длине волны около 1050 нм. Длительности импульса около 77 фс были получены для выходных зеркал с пропусканием 1,5 %, 3,5 % и 5,7 % с максимальной выходной мощностью 24 мВт, 50 мВт и 78 мВт соответственно. Максимальная дифференциальная эффективность для этих зеркал составляет 32,8 % и получена для выходного зеркала с пропусканием 5,7 % (рисунок 2).

Спектр импульсов и автокорреляционная функция для этого случая представлены на рисунках 3 и 4.

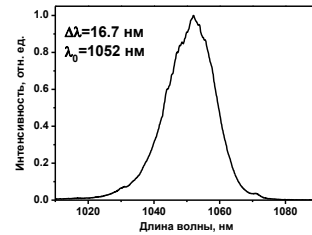


Рисунок 3 – Спектр импульсов Yb:GYSO лазера с поляризацией выходного излучения $E//N_g$

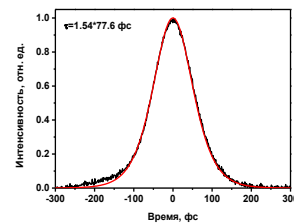


Рисунок 4 – Автокорреляционная функция Yb:GYSO лазера с поляризацией выходного излучения $E//N_g$

Таблица 1 – Результаты лазерных экспериментов на кристалле Yb:GYSO с поляризацией выходного излучения $E//N_g$

№	$T_{ос}$, %	λ_0 , нм	$\Delta\lambda$, нм	τ_p , фс	$P_{псм}$, мВт	η , %	$\Delta\tau_p \cdot \Delta\nu$
1	1,5	1054,5	16,1	78	23,4	9,7	0,340
2	3,5	1054,3	15,9	77	49,6	19,2	0,331
3	5,7	1052	15,7	77,6	71,6	32,8	0,330
4	10	1048,6	12,9	93	70,0	46,1	0,327

Использование более открытого выходного зеркала с пропусканием 10 % приводит к резкому уширению импульса и сужению спектра, но не приводит к увеличению мощности в сравнении с 5,7 % выходным зеркалом, при этом дифференциальная эффективность генерации увеличивается до 46 %. Детальные результаты лазерных экспериментов для лазера с поляризацией излучения параллельно оси N_g в таблице 1.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования кристалла Yb:GYSO для создания эффективных лазерных систем генерации ультракоротких импульсов.

Литература

1. Krupke, W. Ytterbium Solid-State Lasers-The First Decade / W. Krupke // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – Vol. 6, № 6. – P. 1287–1296.
2. Optical and laser properties of Yb:Y₂SiO₅ single crystals and discussion of the figure of merit relevant to compare ytterbium-doped laser materials / R. Gaume, P. H. Haumesser, B. Viana [et al.] // Optical Materials. – 2002. – № 1. – P. 73–78.

УДК 621.372.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКОННОГО РЕФЛЕКТОРА КАК НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ

Лазарчук А. И., Шишко Т. А., Кисель В. Э.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе сообщается о исследовании свойств волоконного рефлектора как насыщающегося поглотителя. Проведено экспериментальное исследование глубины модуляции и пропускания пассивного волоконного рефлектора. Оценочная глубина модуляции составила около 50 %, а пропускание варьируется от 30 % до 90 % в зависимости от падающей мощности и положения контроллера поляризации. Определены особенности поведения спектра, прошедшего волоконный рефлектор в зависимости от падающей мощности и положения контроллера поляризации.

Ключевые слова: оптическое волокно, волоконный рефлектор, насыщающийся поглотитель, контроллер поляризации.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF A FIBER REFLECTOR AS A SATURABLE ABSORBER

Lazarchuk A. I., Shishko T. A., Kisel V. E.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This work reports on the investigation of the properties of a fiber reflector used as a saturable absorber. An experimental study of the modulation depth and transmission of the passive fiber reflector was carried out. The estimated modulation depth was about 50 %, and the transmission varied from 30 % to 90 % depending on the incident power and the position of the polarization controller. The specific features of the spectrum of the laser radiation transmitted through the fiber reflector were determined as a function of the incident power and the polarization controller position.

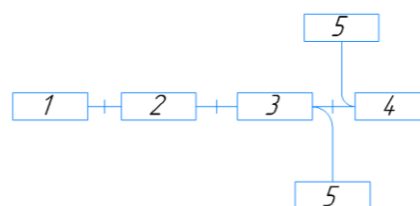
Keywords: optical fiber, fiber reflector, saturable absorber, polarization controller.

*Адрес для переписки: Лазарчук А. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lazarchuka@bntu.by*

В последние десятилетия наблюдается активное развитие волоконно-оптических технологий, что связано с потребностью в компактных, надежных и энергоэффективных элементах для управления лазерным излучением. Одним из ключевых компонентов таких систем являются насыщающиеся поглотители – устройства, способные изменять свои оптические свойства при увеличении интенсивности падающего излучения. Эти элементы находят широкое применение в генерации коротких и сверхкоротких импульсов, стабилизации лазерного излучения и создании пассивных модуляторов добротности.

Волоконные рефлекторы, привлекают внимание исследователей как перспективные насыщающиеся поглотители. Благодаря интеграции в оптическое волокно они обеспечивают минимальные потери, высокую механическую устойчивость и совместимость с существующими волоконными системами. Изучение их свойств позволяет оценить потенциал применения таких элементов в различных типах лазерных и сенсорных систем [1, 2].

В этой работе мы сообщаем о исследовании свойств пассивного волоконного рефлектора как насыщающегося поглотителя. Для исследования параметров оптоволоконных рефлекторов был собран экспериментальный стенд, представленный на рисунке 1, позволяющий провести полные исследования характеристик излучения, прошедшего через оптоволоконный рефлектор.



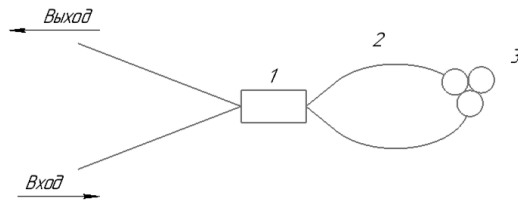
- 1 – источник ультракоротких импульсов;
2 – волоконный изолятор; 3 – волоконный
разветвитель 1×2 ; 4 – оптоволоконный рефлектор;
5 – блок диагностического оборудования

Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для исследования параметров оптоволоконных рефлекторов

В качестве источника ультракоротких лазерных импульсов используется лазерная система 1 на основе задающего лазера, обеспечивающего маломощное излучение со стабильными характеристиками и усилителя для усиления лазерного излучения до мощности необходимой для исследования свойств волоконного рефлектора как насыщающегося поглотителя. Для защиты источника ультракоротких лазерных импульсов от обратного излучения используется изолятор 2. Для измерения характеристик излучения на входе в оптоволоконный рефлектор использовался разветвитель 3×1 с коэффициентом деления 90/10. После разветвителя излучение попадает в оптоволоконный рефлектор 4. Измере-

ние входного и выходного излучения проводилось с помощью блока диагностического оборудования 5.

Схема исследуемого оптоволоконного рефлектора представлены на рисунке 2.



1 – волоконный разветвитель 2×2 ; 2 – пассивное волокно; 3 – контроллер поляризации

Рисунок 2 – Схема исследуемого оптоволоконного рефлектора

Оптоволоконный рефлектор состоит из разветвителя 1×2 с коэффициентом деления 70/30, обеспечивающего разделение и объединение оптического излучения, создавая условия для интерференции и использования нелинейных эффектов, пассивного волокна 2. Для контроля поляризации и определения положение максимумов и минимумов пропускания рефлектора используется контроллер поляризации 3. Контроллер поляризации волокна используют вызванное напряжением двулучепреломление, создаваемое путем наматывания волокна на три катушки, для создания независимых волновых пластин $\lambda/4$, $\lambda/2$, и $\lambda/4$ которые будут изменять поляризацию передаваемого излучения в одномодовом волокне. Быстрая ось волокна находится в плоскости катушки, что позволяет регулировать произвольное состояние входной поляризации путем вращения лопастей.

Зависимость пропускания волоконного рефлектора от падающей мощности показана на рисунке 3.

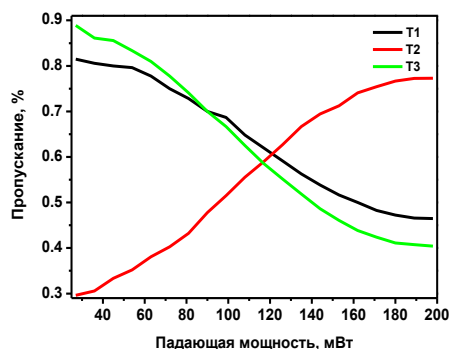


Рисунок 3 – Зависимость пропускания волоконного рефлектора от падающей мощности

Также было рассмотрено влияние волоконного рефлектора на спектр прошедшего излучения. На рисунке 4 изображены спектры излучения импульсов, прошедших петлевой рефлектор, при разном фазовом сдвиге, вносимом контроллером поляризации и спектр импульсов входного излучения.

Для трех разных положений контроллера поляризации были изучены характеристики излучения, прошедшего волоконный рефлектор.

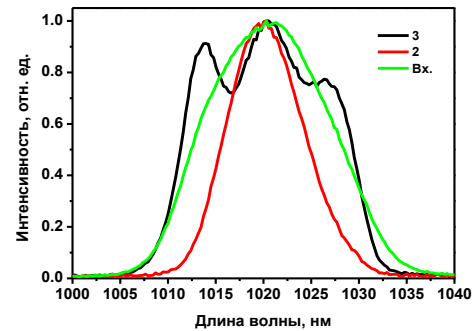


Рисунок 4 – Спектр 3 полученный в точке кривой T3 при средней мощности 198 мВт; спектр 2 полученный в точке кривой T2 при средней мощности 90 мВт; Вх. – спектр излучения входных импульсов

Оценочная глубина модуляции для трех кривых представленных на рисунке составляет около 40–50 % из этого можно сделать вывод что глубина модуляции не сильно зависит от положения контроллера поляризации, а основной вклад вносит схема волоконного рефлектора. Максимальное пропускание для трех случаев составляет от 80 до 90 %, что также может говорить о том, что максимальное пропускание зависит больше от компонентов волоконного рефлектора (разные длины волокон, коэффициент деления разветвителя) чем от положения контроллера. Основное влияние контроллер поляризации оказывает на положения максимума пропускания, меняя этим значение насыщения поглощения, которое является одним из основных параметров насыщающегося поглотителя.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта Ф24МП-041).

Литература

1. Recent developments and advances in artificial saturable absorber for mode-locking in fiber lasers / Y. Chen [et al.] // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26. – Art. 103245.
2. Yang, F. Saturable absorber based on a single mode fiber – graded index fiber – single mode fiber structure with inner micro-cavity / F. Yang, D. N. Wang, Z. Wang // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, № 2. – P. 1127–1134.

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$

Лазарчук А. И., Юмашев. К. В., Герцова А. В., Кисель В. Э.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе сообщается о исследовании свойств термической линзы в кристаллах $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$. Термическая линза было охарактеризовано в $\text{Yb}:\text{Gd}_{1,615}\text{Y}_{0,385}\text{SiO}_5$ лазере работающем в непрерывном режиме для вырезок активного элемента вдоль осей оптических индикатрис N_p , N_m и N_g . Были получены коэффициенты чувствительности термолинзы. Тепловая линза оказалась положительной для всех срезов кристалла. Коэффициенты чувствительности тепловой линзы оказались относительно низкими ($1,3\text{--}3,7 \text{ (мВт)}^{-1}$). Степень астигматизма тепловой линзы составила 24 % для вырезки вдоль N_g , 5,4 % для вырезки вдоль N_m и 54 % для вырезки вдоль N_p .

Ключевые слова: кристаллы оксиортосиликата, иттербий, термическая линза, коэффициент чувствительности, астигматизм.

INVESTIGATION OF THERMAL LENSING IN $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$ CRYSTALS

Lazarchuk A. I., Yumashev K. V., Hertsova A. V., Kisel V. E.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This work reports on the investigation of the thermal lens properties in $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$ crystals. The thermal lens was characterized in a $\text{Yb}:\text{Gd}_{1,615}\text{Y}_{0,385}\text{SiO}_5$ laser operating in continuous-wave mode for active-element N_g -cut, N_m -cut and N_p -cut. Thermal lens sensitivity coefficients were obtained, ranging from 1.3 to 3.7 $(\text{mW})^{-1}$, which are relatively low. The thermal lens was positive for all crystal cuts. The degree of astigmatism of the thermal lens was 24 % for the N_g -cut, 5.4 % for the N_m -cut, and 54 % for the N_p -cut.

Keywords: oxyorthosilicate crystals, ytterbium, thermal lens, sensitivity factor, astigmatism.

Адрес для переписки: Лазарчук А. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lazarchuka@bntu.by

Кристаллы GYSO были разработаны для устранения расскалывания Gd_2SiO_5 и совмещения преимуществ большого расщепления основного мультиплета $^2F_{7/2}$ Gd_2SiO_5 (GSO), которое выше, чем у других лазерных кристаллов, легированных редкоземельными ионами (1076 см^{-1} для $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ [1]), с хорошими механическими свойствами Y_2SiO_5 (YSO). Большое штарковское расщепление приводят к низкой термической заселенности верхнего лазерного уровня нижнего мультиплета. В результате существенно снижается порог генерации, а сечение вынужденного излучения имеет широкую полосу. Также известно, что термическая линза является наиболее важным ограничением для возможностей масштабирования мощности твердотельных лазеров с диодной накачкой.

В этой работе мы сообщаем об исследовании термической линзы в лазере на кристаллах $\text{Yb}:\text{Gd}_{1,615}\text{Y}_{0,385}\text{SiO}_5$ с диодной накачкой, вырезанных вдоль осей оптических индикатрис N_p , N_m и N_g и работающем на длине волны около 1090 нм.

Параметры термической линзы определялись по изменению пространственного профиля выходного лазерного пучка при различных поглощенных мощностях накачки с использованием метода ABCD и с учетом эллиптических гауссовых пучков. Измерения проводились при нескольких уровнях накачки с целью определения фактора чувствительности тепловой линзы, $M = dD/dP_{abs}$ (где D – оптическая сила линзы, P_{abs} – поглощенная мощность накачки). Для анализа

астигматизма термолинзы диаметр пучка контролировался в двух взаимно ортогональных направлениях, соответствующих максимальному и минимальному изменению размера выходного лазерного пучка. Эти направления для всех срезов лазерного кристалла были параллельны и перпендикулярны направлению поляризации лазерного излучения. Профили лазерного пучка анализировались с помощью ПЗС-камеры. Для определения эффекта термической линзы использовался двухзеркальный лазерный резонатор с плоским зеркалом (HR на 1,01–1,1 мкм, НТ на 0,94–0,98 мкм) и плоским выходным зеркалом ($T = 1,5 \%$ на 1,09 мкм) (рисунок 1).

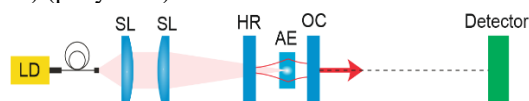


Рисунок 1 – Схема лазера на основе кристалла $\text{Yb}:\text{GYSO}$

Накачка кристаллов $\text{Yb}:\text{GYSO}$ осуществлялась стабилизированным лазерным диодом с длиной волны 976 нм и максимальной выходной мощностью около 2,5 Вт. Пятно излучения накачки диаметром около 200 мкм ($1/e^2$) формировалось в активном элементе с помощью двух линз с фокусными расстояниями 50 и 100 мм.

Для экспериментов использовались активные элементы кристаллов $\text{Yb}^{3+}(4,6 \text{ ат. \%})\text{GYSO}$ толщиной 2 мм и апертурой $8 \text{ мм} \times 1,2 \text{ мм}$. Грани размером $8 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$ поддерживались при температуре

22 °С с помощью медных держателей, а для улучшения теплового контакта использовалась индиевая фольга. Торцевые поверхности кристаллов были покрыты просветляющим покрытием на длинах волн накачки и лазерной генерации.

Выходные характеристики Yb:GYSO лазеров, вырезанных вдоль осей оптических индикатрис N_p , N_m и N_g , представлены на рисунке 2.

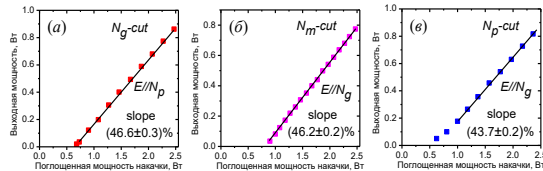


Рисунок 2 – Выходные характеристики Yb:GYSO лазера

Все зависимости линейны, без признаков резкого падения выходной мощности. Лазер работал в режиме TEM₀₀ для всех ориентаций кристалла. Таким образом, для кристаллов вырезанных вдоль осей оптических индикатрис N_p и N_m было получено выходное излучение с поляризацией $E//N_g$, в случае кристалла вырезанных вдоль оси N_g наблюдалось выходное излучение с поляризацией $E//N_p$. Лазер работал на длине волны около 1090 нм для обеих поляризаций. Дифференциальная эффективность составляет 46,6 %, 46,2 % и 43,7 % для кристаллов, вырезанных вдоль осей N_g , N_m и N_p соответственно.

Зависимость диаметра выходного пучка от поглощенной мощности накачки для Yb:GYSO-лазера представлена на рисунках 3, а–в для трех рассматриваемых направлений распространения света в кристалле Yb:GYSO. Здесь точки представляют измеренные диаметры выходного пучка, а кривые – их моделирование на основе метода ABCD. Для всех трех ориентаций кристалла увеличение мощности накачки приводит к уширению лазерного пучка в двух измеренных направлениях. Плоскопараллельный резонатор может быть устойчив только при положительном значении тепловой линзы, фокусное расстояние которой определялось в соответствии с методом ABCD. Термолинза в кристаллах Yb:GYSO положительна для всех ориентаций кристаллов, использованных в исследовании. Измеренные значения оптической силы термолинзы D представлены на рисунке 3, г–е.

Линейная аппроксимация оптической мощности поглощенной мощностью накачки P_{abs}

позволяет определить коэффициент чувствительности M . Минимальный коэффициент чувствительности M был получен для кристалла Yb:GYSO вырезанных вдоль оси N_p , со значениями 2,6 (мВт)⁻¹ и 1,3 (мВт)⁻¹ для направлений вдоль N_m и N_g соответственно (таблица 1). Для кристалла Yb:GYSO вырезанного вдоль оси N_m наблюдался минимальный астигматизм $S = |MN_g - MN_p| - 0,2$.

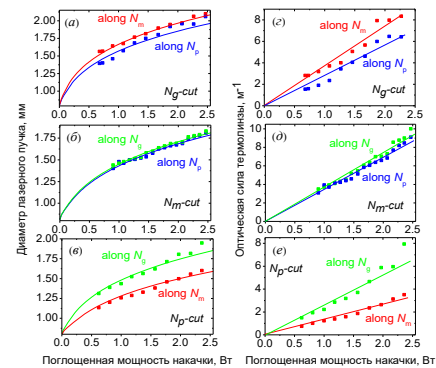


Рисунок 3 – Размер выходного пучка Yb:GYSO-лазера (а–е), оптическая сила термолинзы в Yb:GYSO лазере (г–е)

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что кристалл вырезанный вдоль оси N_m является наиболее предпочтительным для мощных лазерных систем на основе кристалла Yb³⁺:GYSO, поскольку он имеет малый астигматизм тепловой линзы активного элемента и не будет ограничивать выходную мощность лазера при высоких уровнях накачки.

Таблица 1 – Коэффициенты чувствительности M и степень астигматизма S для кристалла Yb:GYSO

Вырезка кристалла	Поляризация выходного излучения	M -фактор, м ⁻¹ Вт ⁻¹	Астигматизм S , %
Вырезка вдоль N_g	$E//N_p$	3,7 ($//N_m$)	24
	$E//N_g$	2,8 ($//N_p$)	
Вырезка вдоль N_m	$E//N_g$	3,7 ($//N_m$)	5.4
	$E//N_p$	3,5 ($//N_p$)	
Вырезка вдоль N_p	$E//N_g$	1,3 ($//N_m$)	54
	$E//N_p$	2,8 ($//N_g$)	

Литература

1. Optical and laser properties of Yb:Y₂SiO₅ single crystals and discussion of the figure of merit relevant to compare ytterbium-doped laser materials / R. Gaume [et al.] // Optical Materials. – 2002. – Vol. 19, № 1. – P. 81–88.

УДК 681.785.554

РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ (ГАЛС) НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРА ОФФНЕРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА С БОРТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Литвиневич Г. С., Ломако А. А., Ивуть П. В., Хомицевич А. Д.

НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ», Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлена разработка гиперспектральной автоматизированной летной системы (ГАЛС) для дистанционного зондирования Земли с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Описаны технические требования и оптическая схема на основе компактного спектрометра Оффнера. Рассчитанные параметры системы подтверждают ее способность обеспечивать более 100 спектральных каналов и пространственное разрешение в 1 м в диапазоне 400–900 нм при поле зрения 28°. Бортовая обработка данных позволяет значительно сократить время между сбором информации и получением готовых результатов, что критически важно для оперативного мониторинга.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование Земли, спектрометр Оффнера, бортовая обработка данных.

DEVELOPMENT OF A HYPERSPECTRAL AUTOMATED FLIGHT SYSTEM (HALS) BASED ON OFFNER SPECTROMETER FOR OPERATIONAL MONITORING FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

Litvinovich H. S., Lamaka A. A., Ivut P. V., Khomitsevitch A. D.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the development of a hyperspectral automated flight system (HALS) for remote sensing of the Earth from onboard unmanned aerial vehicles (UAV). The technical requirements, optical scheme based on a compact Offner spectrometer is described. The calculated parameters of the system confirm its ability to provide more than 100 spectral bands and spatial resolution in 1 m in the range of 400–900 nm with a field of view of 28°. Onboard data processing allows to significantly reduce the time between collecting information and receiving ready results, which is critical for operational monitoring.

Keywords: hyperspectral imaging, unmanned aerial vehicle, Earth remote sensing, Offner spectrometer, on-board data processing.

*Адрес для переписки: Литвинович Г. С., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Введение. Для удовлетворения потребностей отраслевых министерств Беларуси, требующих точной географической привязки, беспилотные летательные аппараты являются оптимальным инструментом. Использование гиперспектральных измерений, обеспечивающих высокое спектральное разрешение, позволяет решать широкий круг тематических задач, включая поиск специфических объектов на местности и детальный анализ характеристик поверхностей. Одним из ключевых научных направлений становится экспресс-обработка данных оптических измерений, что особенно актуально в контексте оперативного получения информации.

Гиперспектральная автоматизированная летная система (ГАЛС). В рамках разрабатываемой научной аппаратуры ГАЛС планируется реализация программного модуля на основе нейро, включая классификацию спектров непосредственно во время полета. Обработка данных осуществляется в главном управляющем модуле на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 4 Model B с Unix-подобной операционной системой, что обеспечивает необходимую вычислительную мощность при компактных размерах.

Модульная структура ГАЛС, включающая систему стабилизации, модуль оценки спектральной освещенности и визуализации, обеспечивает универсальность применения как в летных, так и в наземных условиях (может быть помещена на любую наземную подвижную платформу). Такая комплексная система открывает новые возможности для оперативного мониторинга и кросс-калибровки с другими видами аппаратуры, включая космические системы.

Желаемые технические требования ГАЛС. В соответствии со спецификой задачи, под

которую разрабатывается ГАЛС, были выставлены следующие технические требования (таблица 1).

Таблица 1 – Установленные технические характеристики ГАЛС

Пространственное разрешение, м	1
FOV, градусы	~25–30
Скорость движения БЛА, м/с	1
Высота полета БЛА, м	150
Спектральный диапазон, нм	400–900

Оптическая схема ГАЛС. После анализа технических требований был выбран детектор Basler acA1920-40um и объектив Basler Lens C23-1620-5M f16mm. Дополнительно в корпусе гиперспектрометра размещена камера и объектив тех же моделей для видеофиксации измеряемых объектов.

Спектрометр Оффнера представляет собой концентрическую отражательную оптическую систему из трех зеркал: выпуклой сферической дифракционной решетки и двух сферических зеркал, конструктивно выполненных на одной стеклянной подложке. Такой спектрометр имеет малый объем и небольшие искажения регистрируемого спектрального изображения.

Спроектированный в среде оптического моделирования Zemax спектрометр Оффнера показан на рисунке 1.

Первое и третье зеркала выполнены на одной подложке из стекла К8 с радиусом кривизны 75,34 мм, а выпуклая голографическая дифракционная решетка имеет частоту штрихов 300 штр./мм и радиус кривизны 37,5 мм. Все оптические элементы имеют алюминиевое отражающее покрытие. На детекторе установлен интерференционный «красный» фильтр для удаления вторых порядков дифракции.

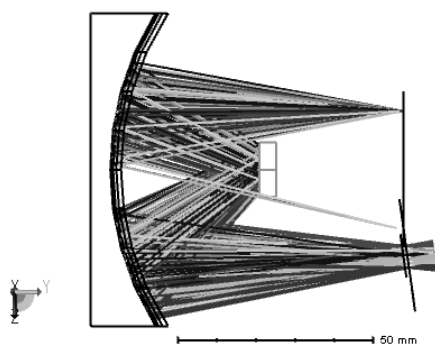


Рисунок 1 – Оптическая схема ГАЛС

Угловое поле зрения гиперспектрометра составило 28° , число регистрируемых спектральных каналов – около 100.

Внешний вид (модель) разработанной системы представлен на рисунке 2.

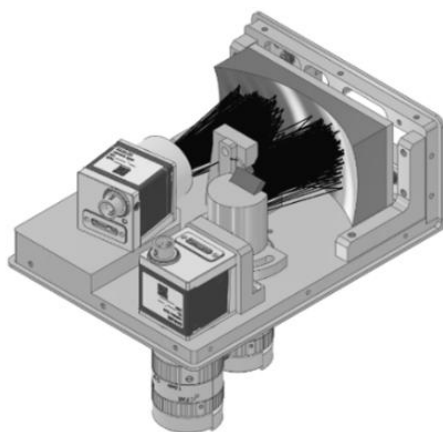


Рисунок 2 – Внешний вид разработанного гиперспектрометра (без защитного кожуха) ГАЛС

С помощью алгоритма, описанного в [1] была рассчитана зависимость отношения сигнал-шум SNR разрабатываемого гиперспектрометра от длины волны при регистрации спектра отражения

растительного объекта для типовых условий летного эксперимента. Рассчитанная зависимость представлена на рисунке 3.

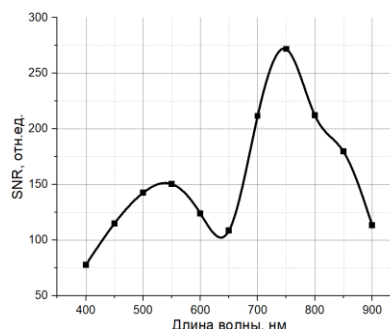


Рисунок 3 – Расчетная зависимость SNR для различных длин волн при регистрации спектра отражения типового растительного объекта в типовых условиях летного эксперимента

Заключение. Проведенные расчеты и проектирование подтвердили возможность создания компактной и эффективной оптической системы на основе спектрометра Оффнера, обеспечивающей более 100 спектральных каналов в заданном диапазоне (400–900 нм) и широкое угловое поле зрения (28°). Рассчитанные показатели отношения сигнал-шум (SNR) демонстрируют, что система способна работать в типовых условиях летного эксперимента и обеспечивать надежную регистрацию данных.

Благодарности. Работа проводится в рамках выполнения отдельного проекта Министерства Образования «Исследование и разработка методов интеллектуального анализа данных, регистрируемых с использованием гиперспектральной автоматизированной летной системы».

Литература

1. Optical Design of a Miniaturized Airborne Push-Broom Spectrometer / Y. Wang, Z. Gu, X. Meng [et al] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 7. – Art. 2627.

УДК 535.313.2

ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Луцкович З. М.², Федорцев Р. В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ совокупных факторов, оказывающих существенное влияние на точность изготовления отражающих поверхностей крупногабаритных асферических зеркал на различных этапах механической обработки. Рассмотрены этапы производства и технического контроля типового технологического процесса изготовления крупногабаритного зеркала объектива диаметром 450 мм.

Ключевые слова: крупногабаритный, асферическое зеркало, технологический процесс, точность формы.

PROBLEMS OF MANUFACTURING LARGE-SIZED OPTICAL ASPHERIC MIRRORS

Lutskovich Z. M.², Fiodartsau R. V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Peleng JSC

Minsk, Belarus

Abstract. An analysis of the cumulative factors that significantly influence the manufacturing accuracy of reflective surfaces of large aspherical mirrors at various stages of machining is conducted. The production and technical control stages of a typical manufacturing process for a large 450 mm diameter lens mirror are examined.

Keywords: large-sized, aspherical mirror, technological process, shape accuracy.

Адрес для переписки: Луцкович З. М., пр-т. Независимости 65, уч.к.17, г. Минск 220013, Республика Беларусь e-mail: psf-ltt@bntu.by

К крупногабаритным круглым оптическим зеркалам относятся изделия диаметром от 200 до 6000 мм. Крупногабаритные оптические элементы требуют специальных материалов с высокой стабильностью, а также особых подходов к их обработке, чтобы избежать деформаций и сохранить форму.

Предпочтительное соотношение диаметра и толщины должно быть в диапазоне 1:5...1:8. Наилучшие марки материалов для изготовления: стекла ЛК-7, К8, К9, BK7, плавленый кварц, Pyrex, Supermax33 (Shott), астроситалл Sitall CO-115M, Zerodur, карбид кремния SiC, кварцевые стекла с ультранизким коэффициентом расширения (ULE) и т.д. В качестве отражающих покрытий используются: алюминий, серебро или золото с защитным слоем SiO₂. Выбор материала определяется рабочим спектральным диапазоном и устанавливается в техническом задании.

По конструктивному исполнению различают сферические или параболические осевые и внеосевые зеркала (рисунок 1) [1].

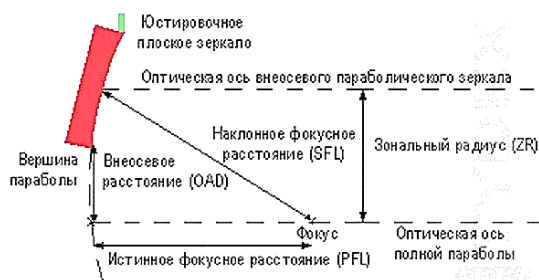


Рисунок 1 – Схема внеосевого параболического зеркала

Асферическая форма поверхности (тороидальная, параболическая, эллиптическая, гиперболическая) сложнее в обработке и полировке, чем сферическая, что требует более точных технологий и оборудования. Для снижения трудоемкости изготовления в качестве исходной заготовки для асферического зеркала выступает как раз сферическое зеркало с наиболее близким радиусом кривизны.

Стандартная точность обработки поверхности составляет: полный размах ошибки (PV) – $\lambda/5$... $\lambda/10$ на контрольной длине волны 632,8 нм; среднеквадратическое отклонение (RMS) – $\lambda/40$. Фокусное расстояние от 150 мм до 12 метров. Максимальный класс чистоты от III до II. В таблице 1 представлен типовой технологический процесс изготовления вогнутого асферического зеркала диаметром 450 мм.

Основные проблемы изготовления крупногабаритных асферических оптических

зеркал включают сложность контроля качества больших выпуклых зеркал, требующих вспомогательных оптических элементов: например, тестовые пробные стекла или эталонные поверхности интерферометров, диаметр которых превышает диаметр самого контролируемого зеркала. Это создает существенные трудности в реализации и масштабировании методов контроля.

Таблица 1 – Типовой технологический процесс изготовления асферических зеркал

Наименование технологической операции	Марка абразивного материала	Режимы обработки (Давление и скорость вращения инструмента)	Время обработки, мин
Предварительное шлифование	M40	4000 гр. 1200 об/с	150
Среднее шлифование	M14	4000 гр. 1200 об/с	400
Финишное шлифование	M7	2000 гр. 1000 об/с	800
Полирование	M1	2000 гр. 800 об/с	10 800

Разработка новых методов контроля, таких как не интерференционные методы, позволяет решить проблему контроля качества больших выпуклых асферических зеркал, особенно на стадиях шлифовки, поскольку они менее зависимы от размеров вспомогательных оптических элементов.

Контроль точности формы поверхности производится контактным методом на контрольно-измерительных машинах производства компании Carl Zeiss. Пример такого измерения представлен на рисунке 2.

Такой метод измерения используется на стадии шлифовки, когда шероховатость поверхности 0,05–0,1 мкм и более. После полировки и достижения поверхностью шероховатости 0,025 мкм она начинает отражать свет и используется более точный бесконтактный способ измерения поверхности.

Применение современных компьютерных технологий для моделирования и управления процессом изготовления позволяет достичь высокой точности в производстве.

После каждой полировки производится интерферометрическое измерение формы поверхности, получаемая картина представлена на рисунке 3.

Это обеспечивает точное определение характера и расположения имеющихся ошибок поверхности внеосевого параболического зеркала. Затем информация из интерферометра поступает в компьютеризированное устройство

управления полировочной машиной. Строится рельефная карта представлена на рисунке 4, по которой назначается обработка.



Рисунок 2 – Контактный способ измерения поверхности асферического зеркала



Рисунок 3 – Интерференционная картина асферического зеркала 450 мм

Инженер подбирает необходимый инструмент, настраивает давление и скорость вращения компактной полирующей головки в зависимости от размеров неровностей поверхности для эффективной обработки. Программа рассчитывает оптимальные траекторию и скорость перемещения компактной полирующей головки для ретуширования возвышенных участков поверхности.

Обычно выполняется более 10 циклов интерферометрических измерений с последующим ретушированием. Безусловно, сложные зеркала требуют значительно большего числа циклов. Конечная шероховатость полированной поверхности может достигать 1 нм.

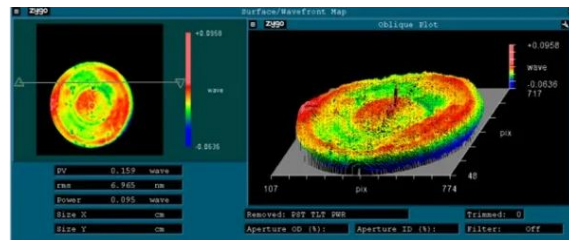


Рисунок 4 – Топограмма поверхности зеркала после программной обработки

Заключение. Представленная технология обработки крупногабаритных асферических зеркал показывает, насколько трудоемким и дорогостоящим является процесс изготовления такой оптики. Большие размеры зеркал в конечном итоге приводит к повышению стоимости изделия и длительности производственного цикла. Типовой процесс изготовления асферического крупногабаритного зеркала занимает не менее 2-х месяцев.

Литература

1. Внеосевые параболические зеркала // TYDEX: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/oap_mirrors/ (дата обращения: 20.12.2025).
2. Асферическая оптика // ООО «Электростекло»: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.elektrosteklo.ru/asph_rus.htm (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 681

ПАССИВНЫЙ ЗАТВОР НА ОСНОВЕ СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ Fe^{2+}

Маляревич А. М.,¹ Кисель В. Э.,¹ Ясюкевич А. С.,¹ Юмашев К. В.,¹ Дымшиц О. С.², Алексеева И. П.,² Жохова Ю. Р.,² Жилин А. А.³

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

²АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

³АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования стеклокристаллических материалов (ситаллов) на основе литиевоалюмосиликатной и литиевогаллиевосиликатной систем, содержащих ионы железа Fe^{2+} , для применения в качестве пассивных затворов лазеров ближнего ИК диапазона спектра. Показано, что в лазере на основе эрбиевого стекла с поперечной диодной накачкой (длина волны излучения 1534 нм) с помощью указанного материала, содержащего 0,1 % оксида железа в исходной шихте, генерировались импульсы излучения длительностью 550 нс и энергией 41 мкДж.

Ключевые слова: ситаллы, двухвалентные ионы железа, пассивный затвор, лазеры ближнего ИК диапазона спектра.

SATURABLE ABSORBER BASED ON GLASS CERAMICS DOPED WITH Fe^{2+} IONS

Malyarevich A. M.,¹ Kisel V. E.,¹ Yasukevich A. S.,¹ Yumashev K. V.,¹ Dymshits O. S.,² Alekseeva I. P.,² Zhohova Yu. R.,² Zhilin A. A.³

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, Russia

³JSC "NIEFA", St. Petersburg, Russia

Abstract. Results of glass ceramics materials based on lithium-aluminum-silicate and lithium-gallium-silicate systems doped with Fe^{2+} ions usage as saturable absorbers for IR lasers are presented. It is shown that in Erbium-glass laser under laser diodes arrow pump (emission wavelength 1534 nm) pulses of 550 ns and energy of 41 μJ were obtained using lithium-aluminum-silicate glass ceramics doped with 0.1 % of Fe oxide in raw material.

Keywords: glass ceramics, Fe^{2+} ions, saturable absorber, near IR lasers.

Адрес для переписки: *Малярович А. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь*
e-mail: *malyar@bntu.by*

Материалы для пассивных затворов лазеров ближнего ИК диапазона представляют большой интерес, поскольку позволяют создавать устройства управления характеристиками лазерного излучения без использования сложных и габаритных систем с внешним электрическим питанием. Известно, что кристаллы с двухвалентными ионами железа, Fe^{2+} , могут использоваться для модуляции добротности эрбиевых лазеров спектрального диапазона 2,7–2,95 $\mu\text{м}$ [1]. Недавно сообщалось о модуляции добротности лазера на $\text{Tm}^{3+}:\text{YAlO}_3$ с помощью композита на основе стекла с наноразмерными кристаллами $(\text{Ga}_{2-x}\text{Al}_x)\text{O}_3$, содержащими ионы Fe^{2+} [2].

В настоящей работе представлены первые результаты применения стеклокристаллических материалов (ситаллов), содержащих нанокристаллы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [3] и $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ со структурой шпинели с двухвалентными ионами железа для модуляции добротности лазеров ближнего ИК диапазона (1,54 и 1,94 $\mu\text{м}$).

Приготовление образцов. Стекла литиевоалюмосиликатной (LAS) и литиевогаллиевосиликатной (LGS) систем массой 400 г были синтезированы в лабораторной электрической печи при температуре 1600 $^\circ\text{C}$ в тиглях из кварцевой керамики с принудительной гомогенизацией расплава. Стекла были отлиты на металлическую плиту и отожжены при температуре 600 $^\circ\text{C}$. Прозрачные ситаллы были получены вторичной термообработкой стекол по двухстадийным режимам 680 $^\circ\text{C}$, 6 ч + 780 $^\circ\text{C}$, 6 ч (стекло системы LAS) и 680 $^\circ\text{C}$, 6 ч + 720 $^\circ\text{C}$, 6 ч (стекло системы LGS). При термообработке в образцах выделялись нанокристаллы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ со структурой шпинели размером 8,0 и 3,2 нм, соответственно. Дифрактограммы образцов ситаллов представлены на рисунке 1.

Для экспериментов были изготовлены полированные образцы ситаллов толщиной 1 мм и поперечными размерами 5 × 10 мм. Спектры пропускания образцов в ближнем ИК диапазоне представлены на рисунке 2. Широкая полоса поглощения в области 1500–2550 нм обусловлена переходами из основного состояния ^5E тетракоординированных ионов Fe^{2+} в возбужденное состояние $^5\text{T}_2$. Отсутствие разрешенных переходов из возбужденного состояния $^5\text{T}_2$ ионов Fe^{2+} дает основания предполагать высокую степень просветления материалов с этими ионами.

Для проведения экспериментов по модуляции добротности использовался лазер на основе кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ с диодной накачкой, который в режиме пассивной модуляции добротности

с помощью кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ генерирует импульсы излучения на длине волны 1940 нм длительностью 10 нс, энергией 40 мкДж и частотой следования 10 кГц. Образцы ситаллов для использования в качестве пассивных затворов имели начальное пропускание $T_0 \approx 70\%$ без просветляющих покрытий. При замене пассивного затвора на основе кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ образцом в виде ситалла с ионами железа в выше описанном лазере достигнуть режима пассивной модуляции добротности не удалось. Причиной, возможно, явилось недостаточно высокое начальное пропускание пассивного затвора.

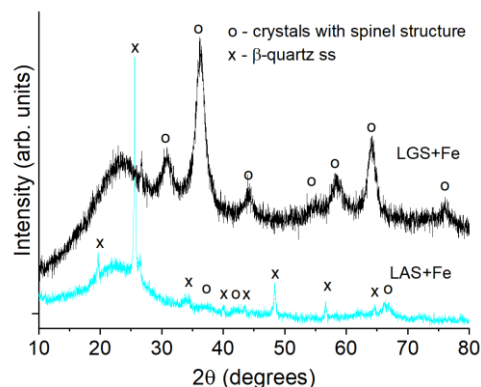


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов ситаллов систем LGS и LAS с двухвалентными ионами железа

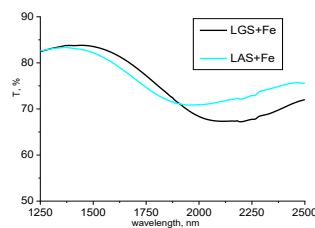


Рисунок 2 – Спектры пропускания образцов ситаллов с двухвалентными ионами железа

Оценивалась возможность применения вышеописанного лазера на основе кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ с пассивным затвором в виде кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ для измерения насыщения поглощения (зависимости пропускания от интенсивности падающего излучения) в исследуемых материалах на длине волны 1,94 $\mu\text{м}$. При фокусировке излучения в пятно диаметром 100 $\mu\text{м}$ достигаемая плотность энергии составляет 0,5 Дж/см², что недостаточно для уверенной регистрации эффекта насыщения поглощения. В настоящее время проводятся работы по увеличению энергии в импульсе указанного лазера.

Также были проведены эксперименты в лазере на основе эрбиевого стекла с поперечной диодной накачкой и длиной волны излучения 1534 нм. Образцы ситаллов на указанной длине волны имели начальное пропускание $T_0 \approx 85\%$ без просветляющих покрытий. Образцы устанавливались под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Лучший результат был получен с образцом ситалла системы LGS, содержащего 0,1 % оксида железа в исходной шихте. Генерировались импульсы излучения длительностью 550 нс и энергией 41 мкДж (рисунок 3).

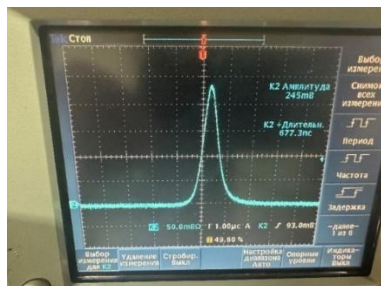


Рисунок 3 – Осциллограмма импульса выходного излучения лазера на эрбиевом стекле, длина волны излучения 1534 нм

Таким образом, в работе впервые продемонстрирована возможность применения прозрачных ситаллов с кристаллической фазой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ со структурой шпинели с двухвалентными ионами железа для пассивной модуляции добротности лазеров с диодной накачкой, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне спектра.

Авторы благодарят К. А. Труханову за помощь в синтезе LAS ситалла.

Литература

1. Насыщающиеся поглотители для пассивной модуляции добротности эрбиевых лазеров, излучающих в области 3 мкм / В. Э. Кисель [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72, № 6. – С. 747–752.
2. In situ and tunable structuring of semiconductor-in-glass transparent composite / L. Lin [et al.] // iScience. – 2021. – Vol. 24. – Art. 101984.
3. Nanostructured transparent Fe^{2+} -doped lithium aluminosilicate glass-ceramics with tunable optical properties: effect of heat-treatment regimes on near-infrared absorption / К. А. Труханова [и др.] // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2025. – Vol. 16, № 1. – Р. 58–66.

УДК 535.37; 53.087

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПРОБ В РЕАКТОРАХ МИКРОФЛЮИДНЫХ УСТРОЙСТВ

Морозов Р. Р., Белов Ю. В., Есикова Н. А., Белов Д. А.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В настоящей работе обсуждены результаты регистрации сигналов флуоресценции от проб, находящихся в реакционных камерах планарного микрофлюидного чипа, при детектировании разработанной экспериментальной установкой. Выявлена возможность детектирования флуоресцентных сигналов с полем зрения $26,5 \times 17$ мм с чувствительностью, сравнимой с коммерческими приборами.

Ключевые слова: регистрация флуоресценции, ПЦР-РВ, микрофлюидный чип.

DETECTION OF FLUORESCENCE SIGNALS OF SAMPLES IN MICROFLUIDIC REACTORS

Morozov R. R., Belov Yu. V., Esikova N. A., Belov D. A.

Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract. This paper discusses the results of fluorescence signals detecting from samples located in the reaction chambers of a planar microfluidic chip using a developed experimental setup with a CMOS camera and LED excitation. It demonstrates the feasibility of detecting fluorescence with a 26.5×17 mm field of view and sensitivity comparable to commercial qPCR devices.

Keywords: fluorescence detection, qPCR, microfluidic chip, SNR

Адрес для переписки: Белов Д. А., а/я 140, Санкт-Петербург, 198095, Россия
e-mail: belov.da@list.ru

Полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР-РВ) – метод генетического анализа, используемый для количественной и качественной оценки искоемых фрагментов ДНК по сопровождающемуся росту интенсивности флуоресценции красителей в анализируемой пробе. Обычно в коммерческих детектирующих амплификаторах, реализующих ПЦР-РВ, реакция протекает в 96-ти луночных планшетах или пробирках объемом 0,2 мл. Оптический блок

амплификатора обеспечивает возбуждение флуоресцентных красителей и детектирование интегрального сигнала флуоресценции от каждой пробирки. Кроме традиционного способа широко используется реализация ПЦР-РВ в микрофлюидных чипах, обеспечивающая значительное снижение объемов анализируемых проб и длительности проведения реакции и повышение точности [1].

Детектирование флуоресцентных сигналов в микрофлюидных чипах при помощи

коммерческих детектирующих амплификаторов не реализуется. Одним из наиболее популярных подходов при детектировании является использование матричных детекторов, которые позволяют регистрировать изображение множества реакционных камер чипа в пределах определенного поля зрения [2]. Подобные системы не могут быть универсальными и, как правило, разрабатываются под конкретные задачи и конфигурации чипов.

В рамках настоящей работы была создана экспериментальная установка, в которой возбуждение флуоресцентных красителей обеспечивалось светодиодом ($\lambda_{\text{ср.}} = 480$ нм, $P = 3$ Вт, $U_{\text{max}} = 6$ В, $I_{\text{max}} = 0,6$ А) через однополосный светофильтр OTF 467–498 нм. Для детектирования использовалась камера Basler acA 1920–50gm с однополосным светофильтром OTF 510–530 нм. На рисунке 1 приведено изображение флуоресценции от микрофлюидного чипа с 3 реакционными камерами: с буферным раствором (i) и растворами флуоресцеина изотхиоцианата концентрацией (ii) $C = 10^{-5}$ М и (iii) $C = 10^{-6}$ М.

Оценка чувствительности предложенной системы выполнялась путем сравнения отношений сигнал/шум системы (SNR_{mf}) со значениями коммерческого прибора (SNR_t) АНК-48 (ИАП РАН, Россия) при использовании идентичных образцов.

Значение SNR_t определялось на основе средних значений интенсивности флуоресценции в пробирках с флуоресцеином F_{t1} и с буфером F_{t2} , а также среднеквадратичного отклонения (СКО) интенсивности флуоресценции в пробирке с буфером SD_t :

Значения SNR_{mf} для предложенной системы оценивалось с помощью программы ImageJ. Для этого выбирались участки изображения (рисунок 1) размером 50×50 пикселей, соответствующие камерам чипа с флуоресцеином (рисунок 1, квадратная область № 2) и с буфером (рисунок 1, квадратная область № 1), определялись средние значения интенсивности флуоресценции на этих участках – F_{mf1} и F_{mf2} соответственно, и значение СКО интенсивности флуоресценции в камере с буфером SD_{mf} . Значения определялись по формуле:

$$SNR_{mf} = (F_{mf1} - F_{mf2}) / SD_{mf}. \quad (2)$$

Результаты сравнения значений SNR_t и SNR_{mf} для двух различных концентраций флуоресцеина приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что чувствительность коммерческого прибора выше: значения SNR_t превышают значения SNR_{mf} в 1,5–2 раза.

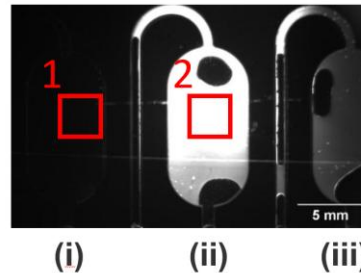


Рисунок 1 – Изображение флуоресценции чипа с реакционными камерами, заполненными: i – буферным раствором; ii – флуоресцеином в концентрации 10^{-5} М; iii – флуоресцеином в концентрации 10^{-6} М

$$SNR_t = (F_{t1} - F_{t2}) / SD_t. \quad (1)$$

Заключение. Выявлено, что предложенная оптическая схема при детектировании флуоресцентных сигналов от проб в микрофлюидных чипах сравнима по чувствительности с коммерчески доступными приборами, реализующими анализ ПЦР-РВ в формате пробирок. Преимуществом предложенной схемы является универсальность с точки зрения возможности использования различных топологий микрофлюидных чипов.

Таблица 1 – Сравнение значений SNR

C , М	F_{mf1} , О.Е.Ф.	SNR_{mf}	F_{t1} , О.Е.Ф.	SNR_t
10^{-5}	$87,0 \pm 3,2$	18,9	1244	35,4
10^{-6}	$37,6 \pm 1,2$	9,4	576	6,54
0 (буфер)	$26,6 \pm 1,1$	–	448	–

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-25-00492.

Литература

1. Present status of microfluidic PCR chip in nucleic acid detection and future perspective / S. Chen [et al.] // TrAC Trends in Analytical Chem. – 2022. – Vol. 157. – Art. 116737.
2. A Review of Optical Imaging Technologies for Microfluidics / P. Zhou // Micromachines. – 2022. – №. 2. – Art. 274.

УДК 535.234+621.373.826

ВОЗМОЖНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СВЕТА НЕРАВНОВЕСНОЙ СРЕДОЙ БЕЗ АБСОЛЮТНОЙ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

Невдах В. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Анализируются процессы взаимодействия излучения с квантовой системой и показано, что все излучательные переходы в такой системе являются вынужденными детерминированными процессами, которые характеризуются скоростями, а константы скоростей этих переходов и соотношения между ними зависят от температуры системы. Получено, что неравновесная среда может усиливать свет и без абсолютной инверсии населенностей.

Ключевые слова: усиление света, скорость излучательного перехода, неравновесная среда.

POSSIBILITY OF LIGHT AMPLIFICATION BY A NON-EQUILIBRIUM MEDIUM WITHOUT ABSOLUTE POPULATION INVERSION

Nevdakh V. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The processes of interaction of radiation with a quantum system are analyzed and it is shown that all radiative transitions in such a system are stimulated deterministic processes that are characterized by rates, and the rate constants of these transitions and the relationships between them depend on the temperature of the system. A non-equilibrium medium can amplify light even without an absolute population inversion was found.

Keywords: light amplification, radiative transition rate, non-equilibrium medium.

Адрес для переписки: Невдах В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by

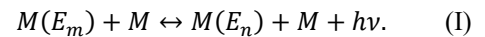
В работе рассматривается квантовая система, состоящая из молекул с дискретными основным E_m и возбужденным E_n уровнями энергии и их теплового излучения. Система является равновесной с температурой T , если в любой момент времени в любой ее точке реализуется больцмановское распределение населенностей молекул N по уровням энергии $N_m = N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}}$ и постоянная плотность энергии теплового излучения – $\rho(\nu, T) = \text{const}$, где h – постоянная Планка, ν – частота излучения. Равновесное состояние достигается за счет процессов взаимодействия молекул между собой при их тепловом движении и их взаимодействии с тепловым излучением.

В каждый момент времени рассматриваемую квантовую систему можно считать состоящей из трех компонент – молекул на возбужденном $M(E_m)$ или основном $M(E_n)$ энергетическом уровне, остальных молекул M и теплового излучения с плотностью энергии $\rho(\nu, T)$. Для любой молекулы, находящейся на определенном энергетическом уровне и совершающей хаотическое тепловое движение, следует различать возможность ее взаимодействия с остальными молекулами M или с излучением и результаты этого взаимодействия. Выбор партнеров для взаимодействия носит случайный характер и может характеризоваться вероятностью, тогда как результаты таких взаимодействий – это результаты конкретных детерминированных физических процессов, характеризующихся скоростями.

Каждому физическому процессу взаимодействия молекул в рассматриваемой системе, приводящему к их переходу с одного энергетического уровня на другой, соответствует обратный процесс. Эти процессы можно представить аналогично представлению прямых и обратных химических реакций [1]. Рассмотрим только оптические переходы в молекулах, т. е. переходы с участием излучения.

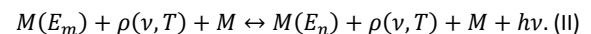
Взаимодействие молекул, находящихся на возбужденном уровне, с другими молекулами может стимулировать переходы, приводящие к изменению плотности энергии теплового излучения. Прямым процессом при таком взаимодействии является излучательный переход молекулы с уровня E_m на уровень E_n с преобразованием разности энергий этих уровней в энергию

электромагнитного излучения, в соответствии с условием условие частот Бора $E_m - E_n = h\nu$. Обратным процессом является поглощение кванта энергии излучения $h\nu$ сталкивающейся молекулой, находящейся на уровне E_n , при ее взаимодействии с излучением и преобразование этой энергии излучения во внутреннюю энергию молекулы. Их можно представить в виде



Пусть $K_{mn}N_mN$ – скорость прямого и $R_{nm}N_nN\rho(\nu, T)$ – скорость обратного процессов в (I), где K_{mn} и R_{nm} – константы скоростей этих процессов, соответственно. Так как столкновения разных молекул носят случайный характер, то они стимулируют испускание разными молекулами ненаправленного и некогерентного излучения.

Оптические переходы могут происходить во взаимодействующих молекулах и при воздействии на них резонансного теплового излучения. Прямым процессом будет излучательный переход с преобразованием внутренней энергии молекулы в квант энергии излучения, а обратным процессом, как и в (I) – поглощение такого же кванта энергии излучения молекулой. Эти процессы можно представить в виде:



Пусть $R_{mn}N_mN\rho(\nu, T)$ – скорость прямого процесса и $R_{nm}N_nN\rho(\nu, T)$ – скорость обратного процесса в (II), где R_{mn} – константа скорости. Излучение, появляющееся в результате этого процесса, является вынужденным излучением, воспроизводящим все свойства вынуждающего излучения. Поэтому, такое излучение ансамбля молекул является когерентным.

Согласно физическому принципу детального равновесия, состояние термодинамического равновесия в системе реализуется только тогда, когда его поддерживает каждая из возможных реакций в этой системе [2]. Это означает, что скорость прямого процесса должна равняться скорости обратного процесса в каждой из реакций (I) и (II). Следовательно, рассматривая для простоты невырожденные уровни молекул, для этих реакций должны выполняться соответственно условия

$$\frac{K_{mn}}{R_{nm}\rho(\nu, T)} = \exp(h\nu/kT) \quad (1)$$

$$\frac{R_{mn}}{R_{nm}} = \exp(h\nu/kT). \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что плотность энергии теплового излучения в рассматриваемой равновесной квантовой системе описывается формулой:

$$\rho(\nu, T) = \frac{K_{mn}}{R_{mn}}, \quad (3)$$

по виду отличающейся от формулы Планка.

Интенсивность теплового излучения I_ν , распространяющегося вдоль выбранного направления в равновесной квантовой системе, определяется плотностью его энергии $\rho(\nu, T)$ и скоростью распространения, т. е. это величина $I_\nu(z) = \rho(\nu, T)v$. Изменение интенсивности излучения $dI_\nu(z)$ в основном обусловлено вынужденными переходами типа (II), а вклад переходов типа (I) незначителен и им можно пренебречь. Следовательно, для $dI_\nu(z)$ можно записать дифференциальное уравнение, которое с учетом соотношения (2) имеет вид

$$\frac{dI_\nu(z)}{I_\nu(z)} = R_{mn} \left(N_m - N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right) \frac{h\nu}{v} dz. \quad (4)$$

Решение этого уравнения с граничным условием $I_\nu(z=0) = I_{\nu 0}$ запишем в виде

$$I_\nu(z) = I_{\nu 0} e^{\beta z}, \quad (5)$$

где коэффициент β равен

$$\beta = R_{mn} \left(N_m - N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right) \frac{h\nu}{v}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что в термодинамически равновесной системе, в которой реализуется больцмановское распределение населенностей молекул по уровням энергии, коэффициент β всегда равен нулю. Из (5) следует, что в этом случае $I_\nu(z) = I_{\nu 0} = \text{const}$ – интенсивность теплового излучения не меняется при его распространении по термодинамически равновесной системе. Следовательно, как и следовало ожидать, плотность энергии теплового излучения одинакова в каждом элементарном объеме такой системы. Это доказывает правильность полученного соотношения (2).

$$N_n > N_m > N_n e^{-\frac{h\nu}{kT}}. \quad (7)$$

Из (6) также следует, что для того, чтобы коэффициент β стал положительным, не обязательно получать неравновесную среду с абсолютной инверсией $N_m > N_n$. Усиливающей может быть и среда, для которой выполняется условие.

Другими словами, неравновесная среда может быть усиливающей и без абсолютной инверсии населенностей.

Литература

1. Невдах, В. В. Об излучательных переходах в равновесной квантовой системе / В. В. Невдах // Невская фотоника-2023: Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 9–13 окт. 2023 г.: сб. науч. тр. / под ред. А. Н. Цыпкина. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – С. 192.
2. Halliday, D. Fundamentals of physics / D. Halliday, R. Resnick, J. Walker. – John Wiley & Sons, 2010. – 1330 p.

УДК 621.373.826

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Орда В. В., Федорцев Р. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные методы юстировки лазеров, включая как традиционные техники, так и новейшие технологии автоматизации и интеллектуального управления. Особое внимание уделяется применению адаптивной оптики, микропозиционирующих механизмов и систем мониторинга параметров лазерного луча в режиме реального времени. Также обсуждается использование алгоритмов машинного обучения для оптимизации процесса настройки лазерных установок, что способствует повышению точности, стабильности и общей эффективности работы оборудования. Представленный обзор показывает, как классические оптические принципы сочетаются с передовыми технологиями, расширяя возможности применения лазеров в научных исследованиях, промышленности и медицине.

Ключевые слова: лазер, юстировка, адаптивная оптика, микропозиционирование.

INTELLIGENT ADAPTIVE SYSTEMS FOR CONTROLLING THE PROCESS OF AUTOMATIC ALIGNMENT OF THE RESONATOR OF THE LASER EMISSION OF ORBITAL SPACE RANGE FINDERS

Orda V. V., Fiodartsau R. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This article explores modern laser alignment techniques, encompassing both traditional methods and cutting-edge automation and intelligent control technologies. It highlights the use of adaptive optics, micropositioning devices, and real-time beam parameter monitoring systems. The discussion includes machine learning applications for optimizing laser system calibration, enhancing precision, stability, and operational efficiency. The

review illustrates the integration of classical optical principles with advanced technologies, broadening the scope of laser applications in science, industry, and medicine.

Keywords: Keywords: laser, alignment, adaptive optics, micropositioning.

*Адрес для переписки: Орда В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nika.orda@mail.ru*

Юстировка лазеров является важным и многогранным процессом, который обеспечивает корректное выравнивание оптических компонентов и максимальную эффективность работы лазерных систем, используемых в самых различных областях. В современных лазерных установках точность юстировки имеет непосредственное влияние не только на качество луча и стабильность рабочих параметров, но и на безопасность эксплуатации, энергозатраты и срок службы оборудования. С развитием технологий требования к методам юстировки стали значительно более строгими, что привело к внедрению новых подходов, основанных на автоматизации, адаптивной оптике, интеллектуальных алгоритмах и комплексном мониторинге состояния системы.

Традиционные методы юстировки, как правило, основываются на ручной настройке с использованием оптических осей, визирных элементов и механических регуляторов. Однако такой подход часто требует значительного времени, высокой квалификации оператора и подвержен человеческому фактору, что ограничивает воспроизводимость и точность результатов. В современных системах все активнее внедряются автоматизированные методы, которые используют обратную связь на основе данных с сенсоров интенсивности и параметров луча, а также цифровую обработку сигналов. Например, исследование Smith et al. (2021) [1], продемонстрировало высокую эффективность автоматизированной юстировки с применением адаптивной оптики, которая может корректировать волновые фронты луча в реальном времени, устраняя дефекты и нерегулярности. Это значительно сокращает время настройки, повышает воспроизводимость результатов и расширяет возможности применения лазеров в сложных условиях.

Особое внимание уделяется юстировке волоконных лазеров, которые находят широкое применение в телекоммуникациях, медицине и промышленности. Как указывают Chen et al. (2020) [3], такие лазеры чувствительны к механическим воздействиям, температурным колебаниям и вибрациям, что затрудняет поддержание оптимального выравнивания и стабильности излучения. Для таких систем были разработаны микропозиционирующие устройства на основе пьезоэлектрических приводов, которые обеспечивают точные и быстрые перемещения оптических компонентов с нанометровой точностью (Liu et al., 2021) [4]. Эти устройства интегрируются в системы автоматического управления, что позволяет поддерживать стабильность излучения в изменяющихся условиях эксплуатации и значительно повышает надежность и долговечность оборудования.

Современные системы юстировки также оснащаются комплексными сенсорными модулями, которые осуществляют мониторинг параметров луча в реальном времени, таких как интенсивность, профиль, угловое распределение и поляризация. Алгоритмы автоматического анализа данных выдают команды на корректировку, что исключает необходимость ручной перенастройки (Kumar et al., 2022). Такой подход не только повышает надежность работы лазерных систем, но и расширяет их применение в сложных технологических и медицинских процессах, где критически важны стабильность излучения и высокая точность настройки.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта для оптимизации процесса юстировки. García и Johnson (2023) [5] продемонстрировали возможность использования обучаемых моделей, которые способны прогнозировать оптимальные параметры настройки на основе большого объема данных с сенсоров, что делает процесс юстировки более адаптивным и эффективным, а также менее зависимым от человеческого фактора. Это особенно актуально для многоэлементных лазерных систем и сложных установок, где традиционные методы настройки становятся крайне трудоемкими.

Дополнительно стоит отметить работы российских ученых, таких как Соколов А. С. и Никитов С. А., которые разработали методику автоматизированной юстировки лазеров с использованием комбинированных оптических и электронных сенсоров, адаптированных к условиям отечественного промышленного производства. Их подход включает применение программируемых микроконтроллеров и алгоритмов коррекции, что позволяет значительно повысить точность юстировки и сократить время на настройку оборудования [6, 7].

На рисунке 1 предложен адаптивный алгоритм управления автоматической юстировкой лазерного дальномера со следующими выходными характеристиками: рабочая длина 1064 нм; длительность импульса 8 нс; расходимость до 2 мрад; энергия импульса 20 мДж; расходимость лазерного излучения на выходе формирующей системы не более 0,3 мрад.

Алгоритм должен обеспечивать стабильность работы лазерного излучателя при изменяющихся внешних условиях: температура (–10 °С...+60 °С), плотность воздуха (1,225–0,413 кг/м³), турбулентность C_n^2 (5×10^{-14} – 1×10^{-17} м^{–2/3}), давление (101,3–26,5 кПа), влажность (90–< 1 %), вибрации и удары (высокий–минимальный), уровень

шума (90–5 дБ), УФ-излучение (1–5 относительных единиц).

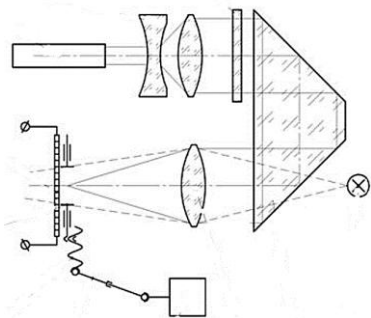


Рисунок 1 – Адаптивный алгоритм управления автоматической юстировкой лазерного дальномера

Конструктивная реализация алгоритма предусматривает наличие двигателя благодаря которому будет приводиться в движение винтовой механизмы, который используя шарпир Гука [8].

Таким образом, современная юстировка лазеров основывается на синтезе классических оптических принципов с передовыми технологиями автоматизации, интеллектуального контроля и адаптивных систем, что открывает новые горизонты для применения лазеров в науке, промышленности, медицине и других высокотехнологических сферах. Повышение точности и эффективности юстировки способствует развитию инновационных технологий и расширению функциональных возможностей лазерных систем, что

делает их незаменимыми инструментами в современном технологическом мире.

Литература

1. Автоматизированная юстировка лазеров с использованием адаптивной оптики / Дж. Смит [и др.] // *Optics Express*. – 2021. – Т. 29, № 15. – С. 24050–24062.
2. Чен, Л. Методы юстировки волоконных лазеров: проблемы и решения / Л. Чен, Ю. Чжао, Х. Ван // *Journal of Laser Applications*. – 2020. – Т. 32, № 4. – Ст. 042008.
3. Пьезоэлектрические микропозиционеры для точной юстировки лазеров / Ф. Лю [и др.] // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2021. – Т. 70. – С. 1–8.
4. Кумар, Р. Мониторинг параметров луча в реальном времени в лазерных системах / Р. Кумар, С. Гупта, Т. Ли // *Sensors*. – 2022. – Т. 22, № 7. – Ст. 2759.
5. Гарсия, М. Методы машинного обучения для оптимизации юстировки лазерных систем / М. Гарсия, К. Джонсон // *Applied Optics*. – 2023. – Т. 62, № 9. – С. 2345–2354.
6. Соколов, А. С. Автоматизированная юстировка лазерных систем с использованием сенсоров обратной связи / А. С. Соколов, С. А. Никитов // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52, № 3. – С. 245–258.
7. Басов, Н. Г. Квантовая электроника / Н. Г. Басов. – М.: Наука, 1986. – 528 с.
8. Белойван, П. А. Автоматизированная юстировка параллельности энергетической оси передающего канала и оси приемного канала лазерного дальномера / П. А. Белойван [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2–2. – С. 136.

УДК 535.6.08 (004.932)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Савкова Е. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен комплексный подход к описанию результатов определения цвета в количественных и качественных методах колориметрии цифровых изображений, основанный на теории множеств и теории графов, позволяющий снижать частные и глобальные риски ошибок первого и второго рода.

Ключевые слова: цвет, цифровое изображение, координата цветности, множество, граф.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO DESCRIBING THE RESULTS OF COLOR DETERMINATION IN DIGITAL IMAGE COLORIMETRY

Savkova Y. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A comprehensive approach to describing the results of color determination in quantitative and qualitative methods of digital image colorimetry based on set theory and graph theory is proposed. This approach allows for reducing the private and global risks of first- and second-order errors.

Keywords: color, digital image, chromaticity coordinate, set, graph.

Адрес для переписки: Савкова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by

В цифровой колориметрии количественные методы исследований переходят в качественные и наоборот, поскольку для отображения цвета используют функциональные цветовые пространства. Поэтому для описания результатов определения цвета может быть применим

комплексный подход. В количественных методах результат измерения представляет собой интервал или область охвата значений величины согласно ISO/IEC GUIDE 98-4:2012(E). В качественных методах осуществляется трансформирование шкал порядка, интервалов,

отношений и абсолютных в категориальные (номинационные), а результат определения цвета представляет собой некоторое качественное свойство, «которое не может быть выражено размером» [1]. При этом «порядковые результаты можно свести к бинарным (да/нет) результатам и обработать путем трактовки результатов порядковой классификации как «правильных» или «неправильных» [2]. В общем случае результат определения цвета описывают оценки: «наилучшая»; рассеяния; вероятностная.

В количественных методах наилучшая оценка выходной величины может быть выражена интенсивностью сигнала в цветовом канале или координатами цвета (цветности) через единственное выборочное значение, математическое ожидание, моду, медиану, рассчитанные по области пикселей на внутриэкземплярном или межэкземплярном уровнях, а также значением, полученным из косвенного измерения.

Оценки рассеяния выражаются неопределенностью, дисперсией, доверительными границами, областью охвата в цветовом пространстве или на графике цветностей. Для моделей с произвольным числом входных и выходных величин результат измерения сводится к совокупности вектор-столбцов и ковариационных матриц, состоящих из ковариационных пар, возрастающих в 2^n раз пропорционально числу входных величин. Определитель ковариационной матрицы является обобщенной дисперсией случайного вектора, который характеризует меру рассеивания случайного n -мерного вектора.

Вероятностная оценка может быть представлена доверительной вероятностью, вероятностью охвата или уровнем доверия в зависимости от способа получения измерительной информации, достоверности, целевого стандартного отклонения, полноты знаний об объекте и других факторов. В цифровой колориметрии вероятностные оценки могут варьироваться в широком диапазоне с использованием различных видов распределений вероятностей (помимо Гаусса или Стюдента).

В качественных методах наилучшая оценка определения цвета выражается символом, набором символов, совокупностями или последовательностями признаков. В детекторных методах оценка величины (с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО 11843-4-2005) может быть представлена «точкой перегиба» на уровнях селективности, пределов обнаружения LOD или количественного определения LOQ, значением в рабочей части диапазона интенсивности цвета и в области, близкой к насыщению диапазона применения метода для одного или более цветовых каналов. Неопределенности обнаружения проявляются в отклонении градуировочных зависимостей $N_R(L)$, $N_G(L)$, $N_B(L)$ от равномерного распределения. Доверительные границы $\varepsilon(N_c)$, характеризующие возможности метода с точки зрения обнаружения в отношении интенсивности цвета N_c цветового

канала C , могут рассчитываться согласно ГОСТ Р ИСО 11843-3-2005 по формуле:

$$\varepsilon(N_c) = \bar{N}_{cb} \pm k_{1-\alpha} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{J} + \frac{1}{K}}, \quad (1)$$

где $\bar{N}_{cb}$ – арифметическое среднее повторений определения базового состояния; σ_0 – среднее квадратическое отклонение; $k_{1-\alpha}$ – коэффициент (квантиль Лапласа $z_{1-\alpha}$ или коэффициент Стюдента $t_{1-\alpha}$); s_0 – оценка среднего квадратического отклонения; J – количество повторений измерений каждого стандартного образца, представляющего нулевое значение приведенной переменной состояния (холостая проба) при применении метода; K – количество повторений измерений в действительном состоянии (исследуемая проба) при применении метода.

Согласно ГОСТ Р ИСО 11843-4-2005 нижняя доверительная граница CL метода определения цвета, соответствующая уровню доверия $100(1-\alpha)\%$:

$$CL = \frac{\bar{y}_g - \eta_b}{\sqrt{s_g^2 + s_b^2}} - \frac{t_{1-\gamma}(v)}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

где $\bar{y}_g$ – выборочное среднее откликов базового состояния; η_b – значение математического ожидания для откликов базового состояния в реальных условиях эксплуатации; s_g – оценка стандартного отклонения откликов образца, приведенная переменная состояния которого равна X_g ; s_b – оценка стандартного отклонения откликов базового состояния; N – количество повторений измерений каждого стандартного образца при оценке способности обнаружения.

В классификационных и идентификационных методах в качестве оценок рассеяния используются показатели «шанс», «неопределенность долей», «тождественность», «однозначность», «последовательность», «отношение правдоподобия» [2], которые определяются при валидации, например, через чувствительность или робастность. В классификационных методах понятие неопределенности также соотносится с идентичностью признаков на межгрупповом или внутригрупповом уровнях, а уровень приемлемости устанавливается для конкретной задачи.

Обобщением количественных и качественных методов цифровой колориметрии является описательный аппарат теории множеств. Так, для совокупности точек с координатами цвета $q(R_i, G_i, B_i)$ в цветовом пространстве RGB, через взвешенный центр которой проходит цветовой тензор G_{RGB} , создавая в продольном сечении цветового пространства векторное поле A_{RGB} , можно записать:

$$A_{RGB} = \{q(R_i, G_i, B_i) | G_{RGB}\}. \quad (3)$$

Для совокупности точек с координатами цвета $q(X_i; Y_i; Z_i)$ в цветовом пространстве XYZ, через взвешенный центр которой проходит цветовой тензор G_{XYZ} , создавая в продольном сечении цветового пространства векторное поле A_{XYZ} , справедливо выражение:

$$A_{XYZ} = \{q(X_i; Y_i; Z_i) | G_{XYZ}\}. \quad (4)$$

Проекция векторного поля A_{XYZ} на график цветности (сечение m) создает скалярное поле $\hat{A}_m$, которое характеризуется множеством точек Ω с координатами цветности $q_k(x_m; y_m)$:

$$\hat{A}_m = \Omega(x_m; y_m) = \{q_k(x_m; y_m) | A_{XYZ}\}. \quad (5)$$

Множество Ω представляет собой область охвата результата определения цвета на плоскости графика цветности:

$$\Omega = \int_{\bar{x}-U_x}^{\bar{x}+U_x} \int_{\bar{y}-U_y}^{\bar{y}+U_y} q(x, y) dx dy. \quad (6)$$

где U_x, U_y – расширенные неопределенности величины по координате x и y соответственно.

В дискретном виде:

$$\Omega = \{q(x_m; y_m) | \hat{A}_m\}. \quad (7)$$

Таким образом, скалярное поле $\hat{A}_m$ характеризуется некоторым конечным множеством точек Ω на плоскости графика цветности. Наилучшей оценкой величины является центр тяжести $q(\bar{x}, \bar{y})$ совокупности точек множества Ω .

Литература

1. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / пер. с англ. и фр. – 2-е изд., испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.
2. Руководство Еврахим/СИТАК «Оценка эффективности и неопределенности в качественном химическом анализе». – 1-е изд. – 2021. – 64 с.

УДК 681.382

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ *p-i-n*-ФОТОДИОДОВ С ГЕТТЕРАМИ, СОЗДАНЫМИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ СУРЬМЫ

Оджаев В. Б.¹, Петлицкий А. Н.², Просолович В. С.¹, Шестовский Д. В.², Явид В. Ю.¹, Янковский Ю. Н.¹, Исмаилов Б. К.³, Кенжаев З. Т.³, Черный В. В.⁴

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Беларусь

³Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова
Ташкент, Узбекистан

⁴Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы вольтамперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттеры, сформированные имплантацией ионов сурьмы, на обратной стороне кремниевой пластины. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины. Показано, что после формирования геттера электрофизические параметры приборов существенно зависят как от вида внедренных ионов, так и режимов последующих преципитирующего и диффузионного отжига. Наличие на вольтамперных характеристиках *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттерирующие центры, созданные имплантацией ионов сурьмы, ступенчатых участков свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда *p-i-n*-фотодиодов.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиод; геттерирующие примеси; ионная имплантация; термообработка.

VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS OF *p-i-n* PHOTODIODES WITH GETTERS CREATED BY ION IMPLANTATION OF ANTIMONY

Odzhaev V. B.¹, Pyatlitski A. N.², Prosolovich V. S.¹, Shestovsky D. V.², Yavid V. Yu.¹, Yankovski Yu. N.¹, Ismaylov B. K.³, Kenzhaev Z. T.³, Chornyi V. V.⁴

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk, Belarus

³Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

⁴Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Volt-ampere characteristics of *p-i-n* photodiodes containing getters phosted by implantation of antimony ions on the back of a silicon wafer were investigated. In parallel, control samples were studied that went through all stages of the instrument manufacturing process, with the exception of implantation of impurities in the non-planar side of the plate. It has been shown that after the formation of the getter, the electrophysical parameters of the devices significantly depend on both the type of embedded ions and the modes of subsequent precipitation and diffusion annealing. Presence of stepped sections on current-voltage characteristics of *p-i-n* photodiodes, which contain gettering centres created by implantation of antimony ions, testifies to thermal generation of charge carriers from deep energy levels of in homogeneously distributed structural defects and technological impurities in the space charge region of *p-i-n* photodiodes.

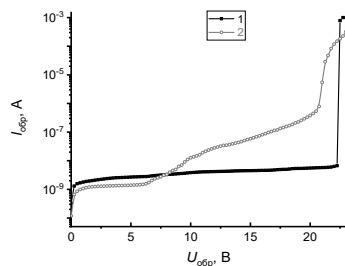
Keywords: *p-i-n* photodiode; getter impurities; ion implantation; heat treatment.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Введение. Эффективность работы $p-i-n$ -фотодиодов в значительной степени определяется величиной темнового тока при обратном смещении, который зависит от времени жизни неосновных носителей заряда. Для повышения времени жизни носителей заряда (τ) применяются различные методы геттерирования, позволяющие создать в рабочей области кремниевой подложки «чистую» зону. Целью работы являлось исследование воздействия геттерирующих центров, созданных ионной имплантацией (ИИ) Sb^+ в нерабочую сторону Si пластины, на электрофизические параметры $p-i-n$ -фотодиодов.

Методика эксперимента. $p-i-n$ -фотодиоды с профилированным $p-i-n$ -переходом [1] изготавливались на пластинах $p-Si$ ориентации (100) с удельным сопротивлением $1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП). Области p^+ анода (изотипный переход) и n^+ катода создавались ИИ соответственно V^+ и P^+ в планарную сторону пластины. Формирование геттера производилось посредством ИИ Sb^+ с энергией 60 кэВ дозами $1,2 \cdot 10^{15}$ – $4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в непланарную сторону пластины с последующими преципитирующим отжигом при 850 °С, 1000 °С или 1050 °С ($T_{по}$) длительностью ($t_{по}$) 30 или 60 мин. Диффузионная разгонка внедренной примеси осуществлялась при 1150 °С или 1200 °С ($T_{до}$) в течение 240 мин. Параллельно исследовались контрольные образцы приборов, подвергавшиеся тем же технологическим операциям за исключением ИИ примесей в непланарную сторону пластины для формирования геттера. Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) $p-i-n$ -фотодиодов регистрировались в диапазоне обратных смещений 0...30 В с шагом 0,25 В и темпом 0,3 мс/В при 20 °С.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведены ВАХ контрольных образцов.

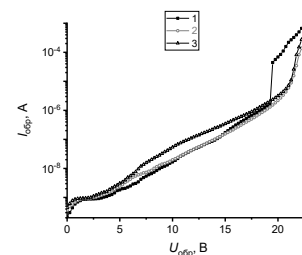


1 – 1150 °С; 2 – 1200 °С

Рисунок 1 – ВАХ контрольных образцов $p-i-n$ -фотодиодов. $T_{до}$, °С

Видно, что повышение температуры, имитирующей диффузионную обработку, приводит к формированию ступенчатой формы ВАХ. Это свидетельствует о существенном вкладе в величину обратного тока ($I_{обр}$)

генерационных процессов, связанных с глубокими энергетическими уровнями (ГЭУ), расположенными в области обеднения. При увеличении температуры отжига увеличиваются коэффициенты диффузии технологических примесей (Fe, Cu, Au и др.), проникающих в материал из технологической оснастки при высоких температурах и создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне. Это приводит к существенному снижению τ и, как следствие, увеличению значения $I_{обр}$ $p-i-n$ -фотодиодов. Вторых, при выращивании Si по методу БЗП формируются скопления микродефектов, в состав которых входят технологические примеси O и C. При 1200 °С происходит трансформация микродефектов с выделением из них большого количества примесных атомов O и C, которые формируют генерационно-активные центры, приводящие к возрастанию $I_{обр}$ в достаточно широкой предпробойной области.



1 – $1,2 \cdot 10^{15}$; 2,3 – $2,4 \cdot 10^{15}$. $T_{по}$, °С: 1 – 850; 2,3 – 1000.
 $T_{до}$, °С: 1,3 – 1200; 2 – 1150

Рисунок 2 – ВАХ $p-i-n$ -фотодиодов с геттером, созданным ИИ Sb^+ $E=60$ кэВ. Дозы ИИ, см^{-2}

На рисунке 2 приведены ВАХ $p-i-n$ -фотодиодов, в которых формирование геттера производилось посредством ИИ Sb^+ . Формирование геттера на обратной стороне кремниевой пластины в данном случае приводит к небольшому увеличению напряжения пробоя (на 0,5–0,7 В), однако при увеличении обратного смещения свыше 2,5 В наблюдается монотонное ступенчатое увеличение $I_{обр}$. Наличие ступенчатых участков ВАХ свидетельствует о термической генерации носителей заряда с ГЭУ неоднородно распределенных в области пространственного заряда $p-i-n$ -фотодиодов структурных дефектов и технологических примесей.

При увеличении дозы ИИ Sb^+ до $4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ВАХ существенно изменяются: происходит снижение величины начала предпробойного участка, а также возрастание $I_{обр}$. При этом происходит и снижение напряжения пробоя до ~13,5 В. Это обусловлено образованием неоднородностей потенциального рельефа вследствие формирования при ИИ и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической струк-

туры, содержащих электрически заряженные центры. Уменьшение величины напряжения пробоя, а также снижение предпробойного напряжения может быть связано с уменьшением значения электрического поля, необходимого для формирования лавинного пробоя, вследствие формирования при ИИ и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической структуры.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

Литература

1. Фотодиод: пат. 7483 U Респ. Беларусь / В. И. Блынский, Е. С. Голуб, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал; заявл. опубл. 25.04.2011 // Афіцыйны бюлетэнь. – 2011. – № 4. – С. 225.

УДК 621.384.3

АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛА МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Свибович И. В.¹, Шкадаревич А. П.¹, Сафонов В. В.¹, Радченко И. М.¹, Кисель В. Э.²

¹Унитарное предприятие «НТИЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются методы решения ряда ключевых проблем неохлаждаемых микроболлометрических матриц: фиксированного пространственного шума, неоднородности откликов, температурных дрейфов и дефектных пикселей. Представлены алгоритмы двухточечной калибровки, статистического детектирования дефектных пикселей с интерполяционным замещением, адаптивной фильтрации и температурной компенсации. Результаты показывают снижение пространственного шума в 2,9 раза, остаточную неоднородность 0,12 %, улучшение сигнал/шум в 2,7 раза и достижение доли исправленных пикселей матрицы в количестве более 98,5 %. Эффективность подтверждена сравнением изображений до и после обработки.

Ключевые слова: микроболлометр, коррекция неоднородности, фиксированный пространственный шум, тепловизионная обработка, дефектные пиксели.

MICROBOLOMETRIC ARRAY SIGNAL CORRECTION ALGORITHMS FOR THERMAL IMAGE QUALITY ENHANCEMENT

Svibovich I. V.¹, Shkadarevich A. P.¹, Safonau U. V.¹, Radchenko I. M.¹, Kisel V. E.²

¹Unitary Enterprise «STC «LEMT» BelOMO»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Methods for solving key problems of uncooled microbolometric arrays are examined: fixed pattern noise, response non-uniformity, temperature drifts, and defective pixels. Algorithms for two-point calibration, statistical defective pixel detection with interpolation replacement, adaptive filtering, and temperature compensation are presented. Results demonstrate $2.9 \times$ spatial noise reduction, 0.12 % residual non-uniformity, $2.7 \times$ signal-to-noise improvement, and matrix operability exceeding 98.5 %. Effectiveness is confirmed by comparing images before and after processing.

Keywords: microbolometer, non-uniformity correction, fixed pattern noise, thermal imaging processing, defective pixels.

Адрес для переписки: Свибович И. В., ул. Макаенка, д. 23, корп. 1, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: svibovich@lemt.by

Неохлаждаемые микроболлометрические матрицы, несмотря на свои преимущества, характеризуются рядом проблем, снижающих качество тепловизионных изображений.

Основной проблемой является фиксированный пространственный шум (Fixed Pattern Noise, FPN), возникающий из-за неоднородности откликов отдельных пикселей матрицы. FPN представляет собой временно устойчивый шум, обусловленный неоднородностью характеристик сенсора, что особенно критично для инфракрасных датчиков из-за их температурной зависимости.

Вторая критическая проблема – неоднородность отклика детекторов. Различия в чувстви-

тельности между пикселями и смещения индуцируют пространственный шум в изображении, требующий снижения на порядок величины ниже временного шума пикселей для достижения высокого температурного разрешения.

Третья проблема – температурные дрейфы характеристик. Характеристики микроболлометров сильно зависят от температуры, что требует дополнительной компенсации из-за временного дрейфа детекторных характеристик и влияния изменений температуры корпуса на отклик матрицы.

Четвертая проблема – наличие дефектных пикселей с аномальными характеристиками, включающих «горячие» пиксели с чрезмерно

высокой чувствительностью и «холодные» пиксели с низкой чувствительностью.

Для решения проблемы коррекции неоднородности была реализована модифицированная двухточечная калибровка (NUC). Получен алгоритм линейной коррекции вида:

$$y_i(\varphi) = [x_i(\varphi) - s_i(\varphi)]/g_i + o_i + s(\varphi), (1)$$

где $x_i(\varphi)$ – исходный сигнал пикселя, g_i и o_i – коэффициенты усиления и смещения, $s_i(\varphi)$ – отклик при закрытом затворе.

Для решения проблемы обновления коэффициентов коррекции было разработано использование изменения отклика пикселя при текущих рабочих условиях относительно эталонных посредством затвора. Получено снижение пространственного шума в 2,9 раза и достижение остаточной неоднородности 0,12 % (σ/m).

Для решения вопроса детектирования дефектных пикселей был реализован статистический критерий с тройным стандартным отклонением. Получена операбельность (количество работающих пикселей) матрицы более 98,5 % при количестве дефектных пикселей менее 1,5 %. Для решения проблемы замещения дефектных пикселей была применена интерполяция по исправным соседним элементам с учетом локальной структуры изображения. Получено восстановление пространственного разрешения без видимых артефактов.

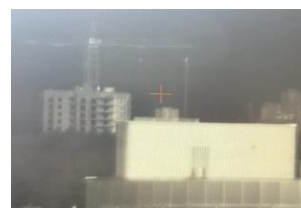
Для решения проблемы временных дрейфов параметров микроболометров, возникающих из-за изменения температуры корпуса и старения детекторов, была реализована система адаптивного обновления калибровочных коэффициентов. При периодическом закрытии затвора система усредняет сигналы от 50 до 100 кадров для получения актуальных значений темнового тока каждого пикселя, что позволяет корректировать коэффициенты коррекции в соответствии с текущими условиями работы. Экспериментально установлено, что оптимальным является 64-кадровое усреднение, обеспечивающее стабильную работу алгоритмов коррекции на протяжении 12 минут непрерывной работы. При этом уровень фиксированного пространственного шума поддерживается ниже уровня случайного временного шума, что гарантирует высокое качество изображения без необходимости частых перекалибровок.

Для решения вопроса пространственной фильтрации были применены адаптивные алгоритмы с изменяющимися параметрами в зависимости от локальных характеристик изображения. Получено эффективное подавление случайных шумов с сохранением мелких деталей.

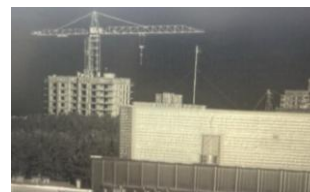
Дополнительной проблемой микроболометрических систем является влияние паразитных тепловых излучений от корпуса, объектива и внутренних элементов камеры. Эти сигналы накладываются на полезный сигнал и создают искажения изображения при изменении температуры окружающей среды.

Для решения проблемы паразитных тепловых излучений была реализована система компенсации собственного излучения оптико-электронного тракта. Метод основан на измерении температуры ключевых узлов камеры встроенными датчиками и математической коррекции сигнала с использованием калибровочных зависимостей паразитного излучения от температуры компонентов. Получено снижение влияния температурных дрейфов корпуса на качество изображения и повышение точности измерений в широком диапазоне рабочих температур.

На рисунке 1, а представлено исходное тепловизионное изображение без обработки, характеризующееся выраженным пространственным шумом, неоднородностью откликов пикселей и дефектными элементами. В результате проведенной работы и применения всех разработанных алгоритмов получено обработанное изображение (рисунок 1, б) с подавленным FPN, скорректированной неоднородностью и замещенными дефектными пикселями. Возросла детализация и контрастность, что влияет на дистанцию распознавания объектов. Количественные результаты показывают снижение общего шума с 14,2 ADU до 5,2 ADU при температуре 28,5 °С, что соответствует улучшению отношения сигнал/шум в 2,7 раза. Временной шум остался на уровне 1,8 ADU, подтверждая эффективность алгоритмов для подавления пространственных искажений.



а



б

Рисунок 1 – Тепловизионные изображения до (а) и после (б) обработки

Представленные методы обработки сырого тепловизионного сигнала обеспечивают комплексное решение основных проблем микроболометрических неохлаждаемых матриц. Работы по дальнейшему улучшению качества изображения продолжают в направлении создания адаптивных алгоритмов машинного обучения, разработки беззатворных методов калибровки и оптимизации вычислительной эффективности для встраиваемых систем реального времени.

УДК 53.082.54

ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ НЕСКОЛЬКИХ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ РАДИОФОТОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «ЧАСТОТА – ВРЕМЯ»

Сидлеров Д. Ю., Микитчук К. Б., Чиж А. Л.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе радиофотонного преобразования «частота – время», реализованного с помощью оптических сигналов с изменяющейся частотой. Изложен принцип метода и экспериментально продемонстрирована возможность одновременного измерения частоты нескольких СВЧ-сигналов.

Ключевые слова: измерение частоты СВЧ-сигналов, режим реального времени, частотно-временное преобразование, радиофотоника.

SIMULTANEOUS MICROWAVE FREQUENCY MEASUREMENT OF SEVERAL MICROWAVE SIGNALS BASED ON PHOTONIC FREQUENCY – TIME CONVERSION

Sidlerov D. Yu., Mikitchuk K. B., Chizh A. L.

SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus

Abstract. In this paper, we study a method for real-time measurement of the microwave signals frequency based on photonic frequency – time conversion using optical signals with varying frequency. The principle of operation of the method is described and the possibility of simultaneous frequency measurement of several microwave signals is experimentally demonstrated.

Keywords: instantaneous microwave frequency measurement, real-time measurement, time-frequency transform, microwave photonics.

Адрес для переписки: А. Л. Чиж, пр. Независимости, 68–1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: chizh@oelt.basnet.by

Введение. В системах радиомониторинга частота является одним из наиболее информативных параметров СВЧ-сигналов, позволяющим идентифицировать и классифицировать их источник. Измерение частоты СВЧ-сигналов в таких системах необходимо в широком диапазоне и в режиме реального времени [1]. Радиоэлектронные системы измерения частоты СВЧ-сигналов обеспечивают малое время измерения (менее 1 мкс) и высокую точность, однако из-за узкополосности радиоэлектронной аппаратуры такие системы обладают сложной архитектурой, особенно для измерения в полосе частот свыше 2 ГГц [2]. Применение радиофотонных методов обработки СВЧ-сигналов в устройствах измерения частоты позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот, а также упростить их архитектуру [3]. В данной работе предлагается новый метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе радиофотонного преобразования «частота – время». Результаты и обсуждение. Структурная схема радиофотонного устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени с помощью оптических сигналов с изменяющейся частотой показана на рисунке 1. Измерение частоты СВЧ-сигналов осуществляется путем ее преобразования во временной интервал, поддающийся измерению более простыми методами.

В таком устройстве оптический сигнал формируется одночастотным лазерным диодом, ток накачки которого изменяется во времени. Затем

оптический сигнал с изменяющейся частотой поступает на вход волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, сформированного на основе оптического разветвителя 2×2 , двух зеркал Фарадея и волоконно-оптической.

Измерение частоты СВЧ-сигналов осуществляется путем ее преобразования во временной интервал, поддающийся измерению более простыми методами. В таком устройстве оптический сигнал формируется одночастотным лазерным диодом, ток накачки которого изменяется во времени. Затем оптический сигнал с изменяющейся частотой поступает на вход волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, сформированного на основе оптического разветвителя 2×2 , двух зеркал Фарадея и волоконно-оптической катушки, обеспечивающей разницу времен задержки τ . Интерферометр Майкельсона позволяет сформировать опорный оптический сигнал, в виде суммы двух составляющих, сдвинутых во времени относительно друг друга на величину задержки τ . Таким образом, в опорном оптическом сигнале в каждый момент присутствует составляющая, частота которой изменяется в соответствии с законом изменения тока накачки лазерного диода, параметры которого заданы таким образом, чтобы разность частот между составляющими опорного оптического сигнала изменялась линейно. Опорный оптический сигнал поступает на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера, где его составляющие модулируются поступающими на электрический вход анализируемыми СВЧ-

сигналами. Оптический сигнал с выхода модулятора Маха-Цендера усиливается оптическим усилителем для компенсации потерь. Оптоэлектронное преобразование оптического сигнала выполняется СВЧ-фотодиодом.

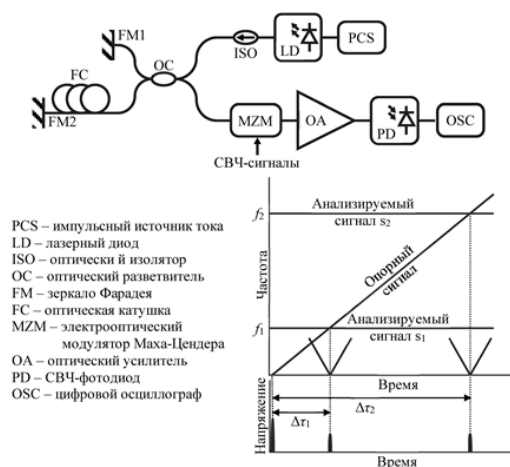


Рисунок 1 – Структурная схема и принцип работы радиофотонного устройства измерения частоты СВЧ-сигналов на основе радиофотонного преобразования «частота-время»

При приеме анализируемых СВЧ-сигналов на выходе устройства формируются импульсы с разностной частотой. При известном линейном законе изменения частоты составляющих опорного оптического сигнала, определение временного интервала между составляющими выходного сигнала с наименьшей разностной частотой (низкочастотных импульсов) позволяет измерять частоты анализируемых СВЧ-сигналов. Для снижения неопределенности измерения частоты для выходного сигнала выполняется расчет частотно-временных распределений.

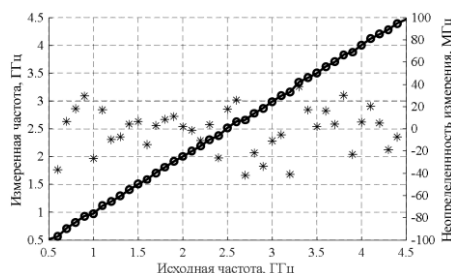


Рисунок 2 – Результаты измерения частоты одиночных СВЧ-сигналов и соответствующая неопределенность измерения

Для проверки работоспособности предложенного метода был собран макет радиофотонного устройства на основе схемы, показанной на рисунке 1. На вход такого макета подавались СВЧ-сигналы с частотами в диапазоне от 0,5 до 4,5 ГГц, ограниченном шириной полосы частот

опорного оптического сигнала, и измерялись соответствующие им временные интервалы между низкочастотными импульсами. На основе измеренных временных интервалов были восстановлены частоты тестовых СВЧ-сигналов. Результаты этих измерений показаны на рисунке 2, из них видно, что неопределенность измерения не превышает 40 МГц. Для демонстрации возможности одновременного измерения частот суммы сигналов на вход макета одновременно подавались несколько сигналов с различной частотой. На рисунке 3 приведены временное и частотно-временное представления выходного сигнала, формирующегося при подаче на вход макета сигналов с частотами 1,00 и 1,06 ГГц. Видно, что при использовании частотно-временного преобразования удается разрешать частоты нескольких сигналов с разностью частот более 60 МГц.

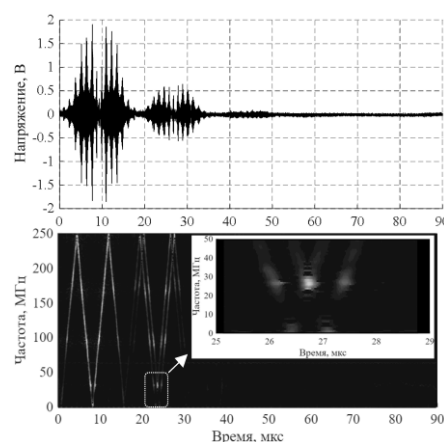


Рисунок 3 – Сигнал на выходе макета радиофотонного устройства измерения частоты, формирующийся при подаче на вход сигналов с частотами 1,00 и 1,06 ГГц (сверху – форма сигнала, снизу – его частотно-временное представление)

Заключение. Предложенный радиофотонный метод измерения частоты позволяет одновременно производить измерение частоты нескольких СВЧ-сигналов в режиме реального времени. Экспериментально показана возможность измерения частоты свыше 4 ГГц с неопределенностью, не превышающей 40 МГц, а также частот нескольких перекрывающихся во времени СВЧ-сигналов с разностью 60 МГц и более.

Литература

1. Tsui, J. Digital techniques for wideband receivers / J. Tsui, C.-H. Cheng. – SciTech Publishing, 2016. – 548 p.
2. Llamas-Garro, I. Frequency measurement technology / I. Llamas-Garro [et al.]. – Artech House, 2018. – 324 p.
3. Zou, X. Photonics for microwave measurements / X. Zou [et al.] // Laser & Photonics Reviews. – 2016. – Vol. 10, № 5. – P. 711–734.

УДК 621.3.038.825.2

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ И ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНЗ

Суринович Е. И., Кисель В. Э.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы разработана экспериментальная установка для исследования порога оптического разрушения просветляющих и отражательных покрытий, определены пороговые значения лучевой прочности металлизированных отражательных и диэлектрических просветляющих покрытий офтальмологических линз на длинах волн $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 1064$ нм для лазерных импульсов в диапазоне длительностей τ от 0,1 до 10 нс

Ключевые слова: лазер, импульсный, лучевая прочность, длительность импульса, энергия.

LABORATORY SETUP FOR LIGHT INDUCED DAMAGE THRESHOLD OF OPTICAL ANTIREFLECTIVE AND REFLECTIVE COATINGS OF OPHTHALMOLOGICAL LENSES

Surinovich E.I., Kisel V.E.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research work the experimental setup for light induced damage threshold (LIDT) measurements was developed for LIDT determination of antireflection and reflection coatings. LIDT values were determined for metallic reflection and dielectric antireflection coatings of ophthalmological lenses for $\lambda_1 = 532$ nm and $\lambda_2 = 1064$ nm wavelength laser pulses with pulse durations from 0.1 to 10 ns.

Keywords: laser, pulsed, radiation strength, pulse duration, energy.

Адрес для переписки: Суринович Е. И., пр. независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: surinovich04@mail.ru

Исследования лучевой прочности оптических покрытий является актуальной задачей для элементной базы приборов, в которых в качестве инструмента выступает лазерное излучение. Материалы покрытий таких элементов имеют определенные требования к воздействию интенсивного лазерного излучения. Порог оптического разрушения таких материалов является ключевым параметром при проектировании и эксплуатации лазерной техники.

Основные цели таких исследований:

Определение предельных характеристик излучения на поверхности элементов (плотности мощности или плотности энергии импульса) при которых в материале возникают необратимые повреждения (микротрещины, оплавления, плазмообразование).

Выбор материалов и покрытий. Сравнение различных оптических материалов и просветляющих покрытий, чтобы подобрать оптимальные варианты для работы с лазерным излучением в рабочем диапазоне энергетических и временных параметров излучения.

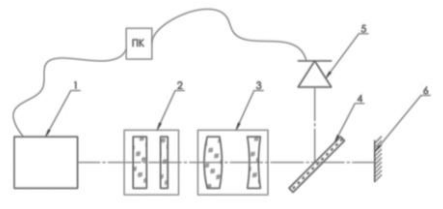
Корректный выбор материалов отражательных и просветляющих покрытий обеспечивает повышение ресурса линз, зеркал, окон, световодов и других элементов, работающих в лазерных системах.

Таким образом исследование порога лучевого разрушения материалов и разработка измерительных средств для регистрации оптического пробоя имеет важную роль в оптическом приборостроении.

Целью данной работы являлась разработка лабораторного комплекса, который позволит

зарегистрировать оптический пробой при изменяющейся плотности энергии, а также оценка порогового уровня разрушения для лазерных импульсов с различной длительностью.

На рисунке 1 показана принципиальная схема установки.



1 – лазер, 2 – аттенюатор, 3 – телескопическая система,
4 – светоделительная пластинка, 5 – измеритель энергии,
6 – образец

Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки

В качестве источника лазерных импульсов использовался Nd: YAG лазер 1, работающий в режиме синхронизации мод. Длительность импульсов составляла $\tau = 0,1$ нс с максимальной энергией до $E_1 = 20$ мДж на длине волны $\lambda_1 = 1064$ нм и $E_2 = 10$ мДж для длины волны второй гармоники $\lambda_2 = 532$ нм. Величина энергии лазерного импульса варьировалась при помощи аттенюатора 2, состоящего из фазовой пластинки $\lambda/2$ и поляризатора. Пространственные параметры пучка в зоне установки исследованных образцов устанавливалась при помощи телескопа 3. Для контроля величины, падающей на образец энергии использовалась делительная пластина 4 и измеритель энергии 5.

На рисунке 2 представлен пространственный профиль излучения лазера в месте установки исследованных образцов.

Измеренный диаметр пучка в перетяжке составлял $d_1 = 500$ мкм для длины волны $\lambda_1 = 1064$ нм и $\lambda_2 = 420$ мкм для длины волны $\lambda_2 = 532$ нм.

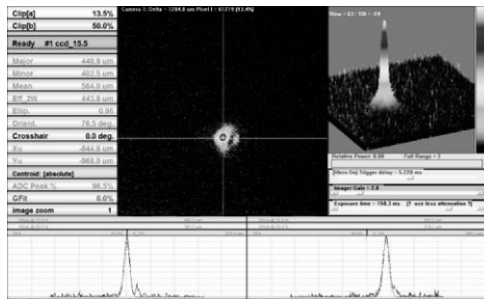


Рисунок 2 – Пространственный профиль лазерного пучка в перетяжке для длины волны 1064 нм

Для оценки плотности энергии оптического разрушения покрытий, для лазерных импульсов длительностью 1 нс и 10 нс, использовалось следующее соотношение:

$$S_2 \text{ LIDT} = S_1 \text{ LIDT} \sqrt{\frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1}}, \quad (1)$$

где $S_2 \text{ LIDT}$ – это расчетная пороговая поверхностная плотность энергии излучения при некоторой длительности импульса $\Delta\tau_2$; $S_1 \text{ LIDT}$ – измеренная пороговая поверхностная плотность энергии излучения при длительности импульса $\Delta\tau_1$.

Результаты экспериментов и расчетов для 4 образцов металлизированных отражательных оптических покрытий для излучения с длиной волны $\lambda_1 = 1064$ нм приведены в таблице 1.

Результаты экспериментов и расчетов для 4 образцов металлизированных отражательных оптических покрытий для излучения с длиной

волны $\lambda_1 = 532$ нм приведены в таблице 2 (образцы 1–4), в таблице 2 также представлен результат для просветляющего диэлектрического покрытия (образец 5).

Таблица 1

Номер образца	SLIDT ($\Delta\tau = 0,1$ нс), Дж/см ²	Расчет SLIDT	
		($\Delta\tau = 1$ нс), Дж/см ²	($\Delta\tau = 10$ нс), Дж/см ²
1	0,296	1,119	3,538
2	0,306	1,157	3,657
3	0,306	1,157	3,657
4	0,194	0,733	2,319

Таблица 2

Номер образца	SLIDT ($\Delta\tau = 0,1$ нс), Дж/см ²	Расчет SLIDT	
		($\Delta\tau = 1$ нс), Дж/см ²	($\Delta\tau = 1$ нс), Дж/см ²
1	0,349	1,319	4,171
2	0,257	0,971	3,072
3	0,263	0,994	3,143
4	0,092	0,348	1,1
5	1,31	4,951	15,657

В работе разработан и апробирован лабораторный комплекс для исследования лучевой прочности оптических покрытий. Проведены эксперименты на образцах просветляющих и отражающих покрытий для оптических элементов, применяемых в офтальмологии, определены пороги оптического разрушения для излучения с длинами волн 1064 нм и 532 нм. Разработанный комплекс может быть использован для оценки качества и надежности оптических покрытий; выбора оптимальных технологий их изготовления.

Литература

1. Агеева, Е. В. Оптические покрытия: физические основы, технологии, свойства / Е. В. Агеева. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
2. Крылов, Б. А. Лазерные повреждения оптических материалов и покрытий / Б. А. Крылов, С. А. Федоров. – М.: Наука, 2005. – 312 с.

УДК 53.072.8:681.7.069.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА КРОМКЕ ТОКАРНОГО РЕЗЦА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Федорцев Р. В.^{1,2}, Конопляников А. А.¹, Горбач Д. В.^{2,3}, Колоницкая В. Ю.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Национальный детский технопарк

³УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено имитационное моделирование локального температурного воздействия лазерного излучения на 3D-объект и выполнена оценка градиента теплового распределения по поверхности инструмента. Расчетно-аналитическим методом определена температура T в зоне взаимодействия лазерного излучения с поверхностью режущей кромки проходного резца из стали марки AISI 321. Установлено, что при диаметре пучка 0,3 мм и глубине прогрева материала инструмента $dp = 0,17$ мм: при импульсном нагреве температура составила $T = 5,91 \cdot 10^4$ °C, а в непрерывном режиме температура нагрева составила $T = 4,62 \cdot 10^4$ °C.

Ключевые слова: имитационное моделирование, лазерный луч, температура, сталь, резец.

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES AT THE EDGE OF A TURNING CUTTER UNDER THE INFLUENCE OF FOCUSED LASER RADIATION

Fiodartsau R. V.^{1,2} Konoplyanikov A. A.¹, Gorbach D. V.^{2,3}, Kolonitskaya V. Yu.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²National Children's Technology Park

³UE "NTC "LEMT" BelOMO"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A simulation modeling of the local temperature effect of laser radiation on a 3D object was performed, and an assessment of the gradient of thermal distribution over the tool surface was performed. The temperature T in the zone of interaction of laser radiation with the surface of the cutting edge of a turning cutter made of AISI 321 steel was determined using a calculation and analytical method. It was found that with a beam diameter of 0.3 mm and a heating depth of the tool material $dp = 0.17$ mm: with pulsed heating, the temperature was $T = 5.91 \cdot 10^4$ °C, and in continuous mode, the heating temperature was $T = 4.62 \cdot 10^4$ °C.

Keywords: Simulation modeling, laser beam, temperature, steel, cutter.

Адрес для переписки: Колоницкая В. Ю., ул. Богдана Хмельницкого 9, к.11а, г. Минск 220013, Республика Беларусь e-mail: bntu@bntu.by

Моделирование лазерного воздействия на поверхность инструмента – это комплексный процесс, включающий применение физических и математических моделей для прогнозирования и анализа результатов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью инструмента, которое может вызвать поверхностную модификацию или упрочнение материала [1].

В работах ряда авторов проводились исследования по созданию математических моделей процесса закалки сканирующим лазерным излучением, например при возвратно-поступательном движении лазерного луча и поступательном движении детали. Выполнены расчет температурного поля при постоянной и переменной мощности лазерного излучения с целью снижения энергетических затрат [2]. Известны также математические модели, в которых исследование формирования температурного поля при упрочнении режущего инструмента импульсным лазерным излучением проводилось методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench [3].

Имитационное моделирование переноса тепловой энергии лазерного луча, проводили для резца проходного отогнутого 2102-0505 ГОСТ 18868-73 Р6М5 (25 × 16 × 140). Моделирование проводилось в программном пакете Solidworks Flow Simulation. Было принято допущение, что теплопередача идет внутри твердых тел, за такой короткий промежуток времени воздействия на образец, количество рассеивания энергии в воздушной среде составляет ничтожно малое значение и стремится к нулю. При этом задачу рассматриваем как нестационарную, т. е. градиент температуры может меняться на соседних участках поверхности с течением времени.

Входные параметры системы.

Воздействие лазерного пучка осуществляется на кромку поверхности резца ограниченную площадкой 5 × 5 мм.

Радиус лазерного пучка в фокальной плоскости составляет $r = 0,15$ мм.

Скорость перемещения лазерного луча $v = 8$ мм/с.

Частота следования импульсов $f = 150$ Гц.

Длительность импульса $\tau = \frac{1}{f} = 6,67 \cdot 10^{-3}$ с.

Выходная мощность лазера $P = 1000$ Вт.

Энергия импульса $E = P/f = 7$ Дж.

Температура внешней среды и температура резца в исходном состоянии $T_0 = 20$ °C.

Периодичность воздействия на поверхность – однократный проход.

Материала резца Сталь Steel Stainless AISI 321.

Плотность материала $\rho = 7790$ кг/м³.

Теплопроводность $k = 17$ Вт/м*С.

Удельная теплоемкость $C = 504$ Дж/кг*С.

Температуропроводность $a = k / (C \cdot \rho)$;

$$a = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент отражения $R = 0,63$.

Для указанной площадки 5 × 5 мм сформировали массив 16 × 16 элементов из окружностей $D = 0,3$ мм. Каждому элементу присвоили цифровое значение: построчно слева направо и последовательно для каждого столбца (рисунок 1).

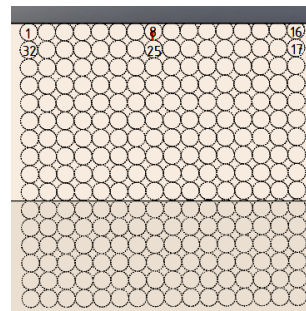


Рисунок 1 – Конечный вариант 3D модели резца

Каждой ячейке применяем условие поверхностного нагрева. Тогда глубина прогрева материала инструмента:

$$dp = \sqrt{a \cdot \tau} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,17 \text{ мм}.$$

Количество импульсов в точке:

$$p = D * f / v = 5,4.$$

Плотность мощности $q = E / (\tau * S) = 1,41 * 10^{10}$.

На первую ячейку у нас действует импульс с 0,005 секунды до 0,01, на вторую: с 0,01 до 0,015, на третью: с 0,015 до 0,02, и так далее. Временной шаг для регистрации расчетных данных системы задаем $5 \cdot 10^{-5}$ с. Таким образом, мы моделируем прохождение лазерного луча по поверхности площадки с его импульсным воздействием на материал (рисунок 2).

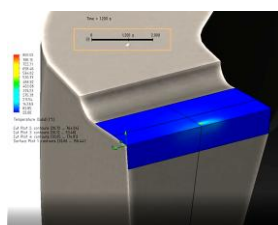


Рисунок 2 – Моделирование лазерного воздействия на кромку резца

Температура T в зоне взаимодействия лазерного излучения с поверхностью режущего инструмента:

при $r_0 \gg \sqrt{a \cdot \tau}$ импульсный нагрев

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a \cdot \tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_0 = 5,91 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

при $r_0 \ll \sqrt{a \cdot \tau}$ непрерывный нагрев

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_0 = 4,62 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При таких высоких температурах материал с поверхности металла будет сублимироваться, т. е. мгновенно испаряться, минуя жидкую фазу.

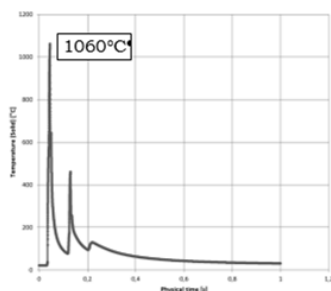


Рисунок 3 – Тепловыделение в точке № 8 на кромке резца

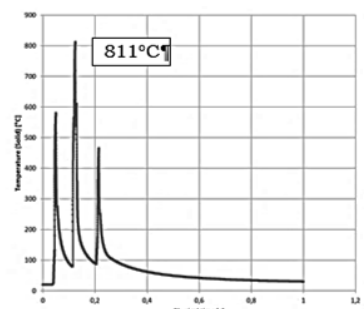


Рисунок 4 – Тепловыделение в точке № 25 на кромке резца

На рисунках 3 и 4 приведены результаты моделирования, отображающие графики распределения температуры в точках № 8 и 25 (осевой разрез на рисунке 1) за эффективное время воздействия лазерного луча на поверхность материала.

Наибольшее значение температуры наблюдается в краевой точке №8 поскольку тепловое рассеивание в материале резца для ее оказалось минимальным. Вторичные пики температур слева и справа от основного импульса представляют собой остаточный тепловой след от предыдущих точек воздействия.

Заключение. Проведено имитационное моделирование локального температурного воздействия лазерного излучения на кромку резца, которое показало, что распределение градиента теплового поля по поверхности инструмента происходит с экспоненциальным затуханием и требует учета остаточного тепла с соседних участков, подвергшихся лазерному воздействию.

Литература

1. Ярьско, С. И. Технология и оборудование импульсной лазерной упрочняющей обработки для инструментального производства / С. И. Ярьско. – Самара: ФИАН, 2010. – 23 с.
2. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443.
3. Ярьско, С. И. Моделирование процесса лазерного упрочнения режущего инструмента / С. И. Ярьско, Д. С. Горяинов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 921–926.

УДК 621.383.5

МОЩНЫЙ ФОТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 20 ГГц С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ

Чиж Н. А., Микитчук К. Б.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе предложена конструкция СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного InGaAs/InP $p-i-n$ СВЧ-фотодиода с частично обедненным поглощающим слоем и оптического усилителя на легированном эрбием волокне для радиофотонных систем генерации и передачи СВЧ-сигналов. В статье исследуются частотные и энергетические характеристики разработанного СВЧ-фотодиодного модуля

с оптическим усилителем, работающего в частотном диапазоне до 20 ГГц и в оптическом диапазоне длин волн от 1,53 до 1,57 мкм.

Ключевые слова: СВЧ-фотодиодный модуль, мощный СВЧ-фотодиод, оптический усилитель на легированном эрбием волокне, радиофотоника.

HIGH-POWER PHOTODIODE MODULE IN THE FREQUENCY RANGE UP TO 20 GHz WITH OPTICAL AMPLIFICATION

Chizh N. A., Mikitchuk K. B.

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, Belarus

Abstract. In this paper, we propose a design of a microwave photodiode module based on a high-power InGaAs/InP $p-i-n$ microwave photodiode with a partially depleted absorbing layer and an erbium-doped fiber amplifier for radiophotonic microwave signal generation and transmission systems. Frequency and energy responses are studied for the developed microwave photodiode module with an optical amplifier operating in the frequency range up to 20 GHz and in the optical wavelength range from 1.53 to 1.57 μm .

Keywords: laser diode module, laser linewidth, optical self-injection locking, microwave photonics.

Адрес для переписки: К. Б. Микитчук, пр. Независимости, 68–1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: mikitchuk@oelt.basnet.by

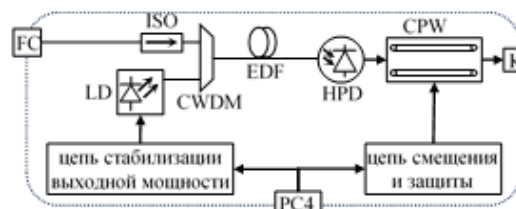
Введение. Системы радиофотоники позволяют реализовать генерацию, передачу и обработку СВЧ-сигналов оптоэлектронными методами, что обеспечивает целый ряд преимуществ по сравнению с подходами традиционной электронной СВЧ-техники: сверхширокополосность, нечувствительность к электромагнитным помехам, малый вес и размеры [1]. СВЧ-фотодиоды с оптоволоконным вводом излучения используются в качестве оптоэлектронных преобразователей и являются одними из ключевых компонентов радиофотонных систем, при этом, в отличие от цифровых волоконно-оптических систем связи, в системах оптической генерации и передачи СВЧ-сигналов важно, чтобы фотодиоды обладали как высокой предельной частотой, так и высокой линейностью энергетической характеристики, что обеспечивает минимизацию искажений сигнала и высокий динамический диапазон, улучшает коэффициент передачи и коэффициент шума [2]. В данной работе рассматривается мощный СВЧ-фотодиодный модуль с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне, а также приводятся экспериментально полученные характеристики модуля. Насыщение оптического усилителя определяется мощностью оптической несущей и практически не зависит от величины мощности передаваемого СВЧ-сигнала, поэтому использование такого усилителя позволяет повысить эффективность оптоэлектронного преобразования и сохранить неизменной частотную характеристику фотодиодного модуля.

Описание модуля. На рисунке 1 представлена схема СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного фотодиода с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне. Оптический сигнал на длинах волн от 1,53 до 1,57 мкм подается на входной оптический разъем типа FC/APC, затем усиливается в легированном эрбием оптическом волокне. Далее усиленный оптический сигнал подается на мощный $p-i-n$ СВЧ-фотодиод на основе двойной гетероструктуры InGaAs/InP с частично обедненным по-

глощающим слоем [3], припаянный методом перевернутого кристалла к копланарной СВЧ-линии передачи с волновым импедансом 50 Ом. На другом конце линии передачи установлен коаксиальный СВЧ-разъем типа К (2,92 мм).

Напряжение смещения на фотодиод подается через цепь смещения, содержащую разделительный конденсатор и индуктивность, а также цепь защиты от теплового пробоя фотодиода (в случае, если на вход модуля подается оптическая мощность, превышающая 25 мВт). Напряжение питания модуля составляет 8 В, а потребляемый ток не превышает 500 мА. Таким образом, требуемая для работы модуля электрическая мощность не превышает 4 Вт.

Характеристики модуля. На рисунке 2 представлены измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем, а также, для сравнения, энергетические характеристики СВЧ-фотодиода на частотах 5, 10 и 20 ГГц. Видно, что использование оптического усилителя позволяет добиться эффективного режима работы от 100 мВт до 23 мВт с изменением мощности на этом интервале не более чем на 5 %. С увеличением частоты от 5 до 20 ГГц максимальная выходная СВЧ-мощность уменьшается с 7 до 5 мВт.



FC – оптический разъем FC/APC, ISO – оптический изолятор, CWDM – мультиплексор по длинам волн, LD – лазерный диод накачки, EDF – легированное эрбием оптическое волокно, HPD – мощный СВЧ-фотодиод, CPW – копланарная СВЧ-линия, K – СВЧ-разъем 2,92 мм

Рисунок 1 – Схема СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилением

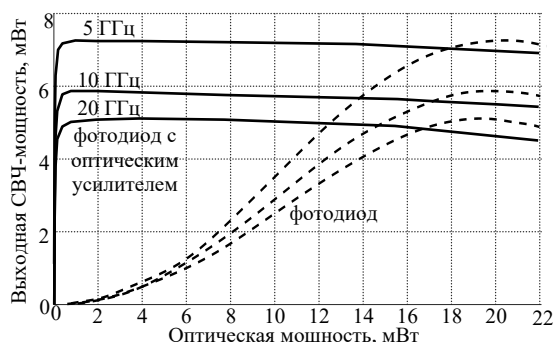


Рисунок 2 – Измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне (сплошные линии) и без него (пунктирные линии) для различных частот 5, 10 и 20 ГГц

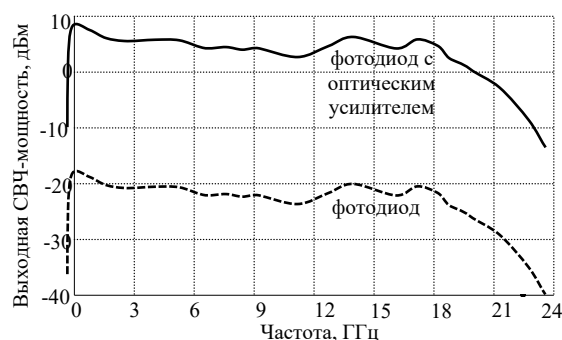


Рисунок 3 – Зависимость выходной СВЧ-мощности СВЧ-фотодиодного модуля с (сплошная линия) и без (пунктирная линия) оптического усилителя от частоты при мощности входного оптического сигнала 1 мВт

На рисунке 3 представлена зависимость выходной СВЧ-мощности фотодиодного модуля с и без оптического усилителя от частоты при мощности входного оптического сигнала 1 мВт и

глубине оптической модуляции 100 %. Видно, что рабочий частотный диапазон модуля составляет от 100 МГц до 20 ГГц. Предельная частота СВЧ-фотодиодного модуля ограничена емкостью $p-n$ перехода, а также паразитными L - и C -элементами, возникающими между чипом фотодиода и копланарной СВЧ-линией, которые также приводят к незначительной неравномерности (± 1 дБ) частотной характеристики. Следует отметить, что добавление оптического усилителя не изменяет вид частотной характеристики, но значительно увеличивает мощность СВЧ-сигнала на выходе модуля.

Заключение. В данной работе предложена конструкция СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного InGaAs/InP $p-i-n$ СВЧ-фотодиода с частично обедненным поглощающим слоем и оптического усилителя на легированном эрбием волокне. Из измеренных на различных частотах входного сигнала энергетических характеристик мощного СВЧ-фотодиодного модуля видно, что при использовании оптического усилителя выходная мощность СВЧ-сигнала фотодиодного модуля изменяется менее, чем на 5 % при изменении входной оптической мощности от 100 мкВт до 23 мВт, что позволяет использовать его в радиофотонных системах генерации и передачи СВЧ-сигналов.

Литература

1. Урик-мл., В. Основы микроволновой фотоники / В. Урик-мл. [и др.]. – М.: Техносфера, 2016. – 376 с.
2. Beling, A. High-power, high-linearity photodiodes / A. Beling [et al.] // Optica. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 328–338.
3. Malyshev, S. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation / S. Malyshev [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2008. – Vol. 26, № 15. – P. 2732–2739.

УДК 621.327

СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ С КАПИЛЛЯРНЫМ РАЗРЯДОМ В КСЕНОНЕ Чиликина П. А.

ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта», Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена изучению спектрально-энергетических характеристик источников излучения с капиллярным разрядом в ксеноне. Изучены зависимость спектрального распределения энергии излучения от диаметра капиллярного канала, зависимость яркостной температуры от энергии разряда и плотности тока, показана возможность достижения яркостной температуры излучения 13,2 кК, что соответствует максимуму выхода излучения в центре коротковолнового УФ-С диапазона.

Ключевые слова: импульсная лампа, УФ излучение, плазменный канал, энергия излучения, яркостная температура, капиллярный разряд.

SPECTRAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF UV PULSED RADIATION SOURCES WITH CAPILLARY DISCHARGE IN XENON

Chilikina P. A.

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of spectral and energy characteristics of radiation sources with capillary discharge in xenon. The dependence of the spectral distribution on the diameter of the capillary channel was studied, the dependence of the brightness temperature on the discharge energy and current density was shown, the

possibility to achieve the brightness radiation temperature 13.2 kK, which corresponds to the maximum radiation output in the center of the short-wave UV-C range, was demonstrated.

Keywords: flash lamp, UV radiation, plasma channel, radiation energy, bright temperature, capillary discharge.

Адрес для переписки: Чиликина П. А., ул. Миклухо-Маклая, 16/10, г. Москва, 117997, Российская Федерация
e-mail: p.chilikina@gmail.com

Импульсный ксеноновый разряд короткой длительности ($\tau < 150$ мкс) является источником мощного УФ-излучения сплошного спектра, что сделало их одними из перспективных источников излучения для обеззараживания воздуха [1]. Важной эксплуатационной характеристикой данного класса ламп, определяющей применимость лампы в обеззараживании, является доля излучения в бактерицидном диапазоне ($\Delta\lambda_b = 200\text{--}300$ нм) от всей излученной энергии в оптическом диапазоне. Стремление привести в соответствие спектр источника излучения спектру чувствительности микроорганизмов для решения задач обеззараживания, т.е. достижение максимума относительной спектральной интенсивности в центре бактерицидного интервала длин волн или, в случае вирусов, в центре дальнего УФ-С диапазоне ($\Delta\lambda_{\text{УФ-Сfar}} = 200\text{--}240$ нм), ставит задачу повышения яркостной температуры излучения импульсной ксеноновой лампы. Исходя из приближенной оценки по закону Вина, для достижения спектрального распределения излучения с максимумом в центре коротковолнового УФ-С диапазона 200–240 нм, яркостная температура $T_{\text{ярк}}$ должна составлять 13,2 кК, а в центре бактерицидного интервала длин волн 200–300 нм необходимо, чтобы $T_{\text{ярк}}$ достигала величины 11,6 кК. Высокие температуры и яркости в разрядном канале могут быть получены при создании в канале разряда больших плотностей выделяющейся энергии. В этом направлении представляет интерес ограничение области, в которой распространяется разряд, трубкой диаметром менее 4 мм – реализация схемы капиллярного разряда, что позволяет снизить потери на самопоглощение выходящего из плазмы излучения [2]. Другим методом повышения яркостной температуры излучения является наращивание осевой температуры плазменного канала. В данной работе нами выполнены исследования спектрально-энергетических характеристик импульсных ксеноновых источников УФ излучения с капиллярным разрядом, ограниченным стенками кварцевой трубки диаметром 3 мм.

Методика испытаний. Для проведения исследований были изготовлены две экспериментальные импульсные лампы с диаметром канала 3 мм, заполненные ксеноном до давления в холодном состоянии 220 и 350 мм рт. ст. соответственно. Для изучения влияния диаметра разрядного канала на яркостную температуру, спектрально – энергетические характеристики при общем токе лампы были изготовлены образцы импульсной ксеноновой лампы с межэлектродным промежутком, состоящим из трех участков диаметрами 3 мм, 5 мм и 7 мм, и с давлениями

220 и 300 мм рт. ст. Лампы испытывались в разрядном контуре: емкость накопительного конденсатора $C = 10$ мкФ, энергия разряда варьировалась в диапазоне $W = 4,1\text{--}48,5$ Дж. Для пробоя межэлектродного промежутка использовался параллельный поджиг. Регистрация УФ излучения проводилась посредством фотодиода TOCON C6 (область спектральной чувствительности 0,24–0,28 мкм – диапазон 2) и спектрометра AvaSpec-ULS2048CL, методика регистрации подробно описана в работе [3]. Для регистрации характеристик излучения плазменного канала определенного диаметра применялась специальная диафрагма 9, позволяющая выделять требуемый участок разрядной трубки за счет экранировки остальной части межэлектродного расстояния.

Результаты исследований. В ходе выполненных исследований подтверждены сделанные предположения о диаметре плазменного канала на яркостную температуру излучения. Во-первых, увеличение плотности тока в канале за счет уменьшения его диаметра приводит к повышению доли излучения от всей излученной энергии в бактерицидном спектральном диапазоне $\Delta\lambda_b = 200\text{--}300$ нм и, соответственно, к повышению яркостной температуры излучения (рисунок 1).

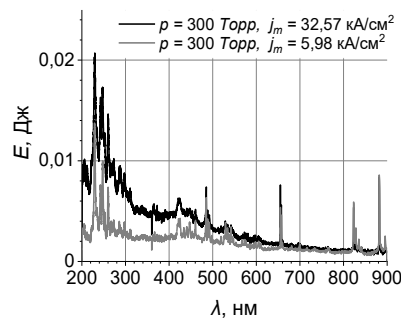


Рисунок 1 – Спектральная энергия излучения при различных диаметрах канала на примере трехступенчатой лампы с $p = 300$ Торр

Во-вторых, показано, что скорость роста яркостной температуры с увеличением вложенной энергии в случае лампы с диаметром $d = 3$ мм существенно выше, чем для лампы с $d = 5$ мм (рис. 2).

В-третьих, показано, что увеличение разрядного тока (мощности) приводит к повышению яркостной температуры, но сопровождается снижением сопротивления плазменного канала, что приводит к нелинейности роста яркостной температуры (рисунок 3), построены зависимости $T_{\text{ярк}}(j_{\text{max}})$. Показано, что кривая $T_{\text{ярк}}(j_{\text{max}})$ для импульсных ламп с давлением $p = 300$ Торр лежит выше, чем для ламп с давлениями 220 Торр

и 350 Торр, что косвенно свидетельствует о том, что данного давление наполнения оптимально для получения наибольшей энергии излучения в рассмотренном спектральном диапазоне, однако для определения оптимального p требуются дальнейшие исследования в более широком диапазоне пиковых объемных мощностей.

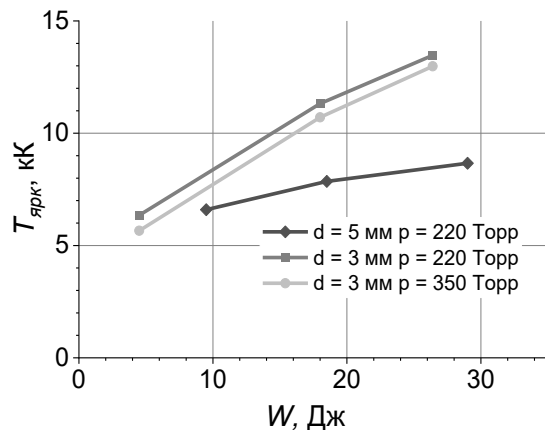


Рисунок 2 – Зависимость яркостной температуры от энергии разряда

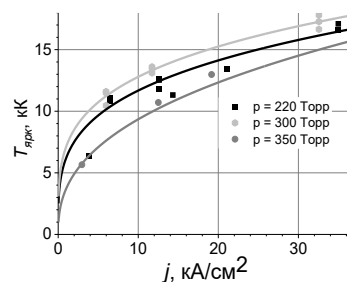


Рисунок 3 – Зависимость яркостной температуры излучения капилляра с $d = 3$ мм от плотности тока

Литература

1. Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра / Н. В. Шестопапов [и др.] // Медицинский алфавит. – 2017. – Т. 2, № 18. – С. 5–8.
2. Импульсные источники света / под ред. И. С. Маршак. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
3. Киреев, С. Г. Измерение спектрально-энергетических характеристик импульсных источников излучения сплошного спектра / С. Г. Киреев, В. П. Архипов, С. Г. Шашковский, Н. П. Козлов // Фотоника. – 2017. – № 8(68). – С. 48–56.

УДК 621.375.826

МНОВОВОЛНОВОЙ ТЕА ЛАЗЕР С КОМБИНИРОВАННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ ГЕНЕРАЦИИ

Шавель С. С., Горобец В. А., Бушук С. Б.

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

Аннотация. Для реализации мнововолнового режима в ТЕА лазере, генерирующем в нескольких спектральных диапазонах (1,1–3,5 и 9,2–10,8 мкм), используемом в дистанционном газоанализаторе, предложена неавтоколлимационная схема резонатора, сопряженная с разделением каналов генерации по взаимно ортогональным поляризациям. Разработана конструкция такого лазера с реализацией заданной последовательности световых импульсов на разных длинах волн. Переключение между линиями генерации осуществляется за счет последовательного автоматизированного внесения в каждый из каналов непрозрачной маски. Предложенная схема резонатора позволяет не только оптимизировать геометрическое расположение оптических элементов лазера, но и значительно облегчает последующую регистрацию излучения в приемном блоке газоанализатора.

Ключевые слова: ТЕА лазер, инертные газы, CO₂, поляризация.

MULTI-WAVE TEA LASER WITH COMBINED CHANNEL SEPARATION

Shavel S. S., Gorobets V. A., Bushuk S. B.

State Research and Production Association "Optics, optoelectronics and laser technology", Minsk, Belarus

Abstract. To compliment a multi-wave mode in a TEA laser generating in several spectral ranges (1.0–4.0 and 9.2–10.8 μm) used in a remote gas analyzer, a non-autocollimation cavity scheme based on the separation of generation channels by mutually orthogonal polarizations is proposed. A design of such laser with the realisation of a pre-defined sequence of light pulses at different wavelengths has been developed. Switching between oscillation lines is carried out by automatized introducing an opaque mask into each of the channels. The proposed cavity scheme allows not only to optimize the geometric arrangement of the laser optical elements, but also significantly facilitates the subsequent registration of the studied radiation in the receiving unit of gas analyzers.

Keywords: TEA laser, inert gases, CO₂, polarization.

Адрес для переписки: Шавель С. С., пр. Независимости, 68-1, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск 220072, Республика Беларусь,
e-mail: shavel_s07@mail.ru

Введение. В работе представлены результаты по получению лазерной генерации в ТЕА лазерной системе, работающей в нескольких спектральных диапазонах за счет использования комбинированной газовой смеси, содержащей помимо молекул CO_2 инертные газы.

Возможность получения одновременной генерации в двух спектральных диапазонах 1,1–3,5 и 9,2–10,8 мкм обеспечивается за счет использования комбинированной газовой смеси, включающей небольшое количество излучающих инертных газов и молекул углекислого газа и много гелия (например, $\text{Xe}:\text{CO}_2:\text{He} = 1:1:100$). Генерация в каждом из диапазонов (1,1–3,5 и 9,2–10,8 мкм) происходит на инертных газах (Xe , Kr , Ar , Ne) и молекулах CO_2 , соответственно [1].

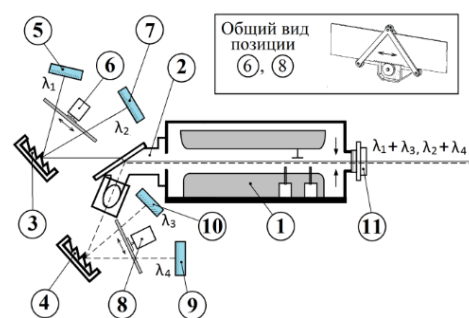
При этом, важно также обеспечить простое и надежное разделение линий генерации.

Обычно для получения линий генерации в схеме многоволнового селективного резонатора лазера используется неавтоколлимационное расположение оптических элементов с использованием дополнительных зеркал. Альтернативным путем получения нескольких генерирующих линий является разделение по поляризации. Каждая из схем имеет преимущества и недостатки. В неавтоколлимационной схеме – это трудности с геометрическим разнесением близкорасположенных линий генерации. При разделении по поляризации число возможных каналов ограничено (2 канала).

В настоящей работе предлагается совместить оба подхода за счет селекции каналов генерации как по поляризации, так и с помощью неавтоколлимационной многоволновой схемы резонатора, в которой в каждом из каналов попеременно вносятся блокирующие элементы, поочередно перекрывающие линии генерации в каждом канале.

Схема лазера приведена на рисунке 1.

Из рисунка видно, что генерация канала I (сплошная линия) формируется в резонаторе, образованном глухими зеркалами 5, 7 с радиусом кривизны 6,8 м и плоской дифракционной решеткой 3 (100 штрих/мм), работающей в первом порядке (коэффициент отражения 0,94). Вывод излучения (~30 %) осуществляется через выходное зеркало 11. Резонатор канала II (пунктир) образован зеркалами 9, 10, дифракционной решеткой 4, подобной решетке 3, и окном 2 с пластиной из стекла ZnSe , расположенной под углом Брюстера. Окно 2 полностью пропускает линейно поляризованное излучение, формируемое в резонаторе канала I, и в то же время отражает ортогонально поляризованное излучение, формируемое в резонаторе канала II. Вывод излучения осуществляется через выходное зеркало 11. Таким образом, происходит разделение излучения по взаимно ортогональным поляризациям, генерируемого в одной активной среде. База резонатора для каналов I и II составляла ~1,5 м.



1 – разрядная камера; 2 – окна Брюстера для «параллельного» и «ортогонального» излучения; 3, 4 – дифракционная решетка; 5, 7 – отражающие зеркала резонатора (канал I); 6, 8 – электромеханический узел с блокирующим элементом; 9, 10 – отражающие зеркала резонатора (канал II); 11 – выходное зеркало резонатора

Рисунок 1 – Оптическая схема лазера

Для быстрого переключения линий генерации используются установленные в резонаторах каналов синхронизованные между собой электромеханические узлы 6 и 8 сдвигаемыми непрозрачными масками. Эти узлы, в соответствии с заданным алгоритмом, обеспечивают поочередную блокировку отдельных линий генерации, оставляя окно только для одной генерирующей линии в каждом из каналов с взаимно ортогональной поляризацией. Узлы выполнены на базе цифровых шаговых двигателей, подключенных к управляющей плате с микроконтроллером Arduino и работающих по вновь созданному запрограммированному алгоритму. Плата, управляющая положением непрозрачных масок, имеет синхронизацию с блоком управления лазерным излучением. Предложенная схема позволяет переключать каналы за время менее одной секунды. При этом, тот факт, что генерация на возможных длинах волн осуществляется последовательно по заданной программе, может быть легко использован в приемном устройстве газоанализатора для идентификации импульсов.

Предложенная схема резонатора может легко быть модифицирована на нужное количество линий генерации за счет увеличения числа дополнительных зеркал в каждом канале с разной поляризацией.

В случае реализации схемы, приведенной на рисунке, можно получить по две спектрально отличающихся линии генерации для каждого поляризационно отличающегося канала излучения.

Следует отметить, что все каналы генерации могут работать одновременно, если исключено их взаимное влияние друг на друга, например, за счет эффекта «узкого вращательного горла» [2] или за счет использования разных сортов активных молекул и механизмов возбуждения (например для генерации на CO_2 и инертных газах [1]). На практике, однако, при работе в составе дистанционного газоанализатора предпочтительнее использовать переключение каналов генерации, настроенных на

разные диапазоны. Это позволяет заранее настраивать лазер на работу с заданными линиями и избежать применения подвижных элементов резонатора, ухудшающих точность настройки на линию. Возможность синхронизации световых импульсов зондирующего лазера с фотоприемниками приемного блока также значительно облегчает последующую обработку сигналов.

Заключение. Таким образом, предложена схема получения в ТЕА лазерной системе генерации в заданной последовательности импульсов в диапазонах 1,1–3,5 и 9,2–10,8 мкм за счет использования комбинированного резонатора с поляризационным и спектральным разделением линий генерации. Генерация в двух диапазонах осуществляется на молекулах инертных газов и

CO₂. Такая система может найти применение в газоанализаторах, работающих по дифференциальному методу (применение «on-» и «off-» линий для каждого измеряемого газа), где требуется попарная одновременная генерация в нескольких спектральных диапазонах.

Литература

1. Шавель, С. С. ТЕА лазер, генерирующий в нескольких спектральных диапазонах / С. С. Шавель [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 835–842.

2. Кунцевич, Б. Ф. Полевой механизм одновременной генерации на нескольких переходах в ТЕА CO₂-лазерах / Б. Ф. Кунцевич [и др.] // Квантовая электроника. – 1993. – Т. 20, № 6. – С. 559–566.

УДК 535; 004.032.26

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Шанчук В. А., Артюхина Н. К., Чергейко С. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлен обзор основных задач, в рамках которых является целесообразным применять алгоритмы на основе нейронных сетей. Кратко описаны основные особенности работы алгоритмов, а также перспективы их применения для проектирования современных оптических систем.

Ключевые слова: нейронные сети, искусственный интеллект, оптическая система, проектирование.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO MODERN OPTICAL SYSTEMS DESIGN

Shanchuk V. A., Artiukhina N. K., Charheika S. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper provides an overview of the main tasks in which it is advisable to apply algorithms based on neural networks. The basic features of the algorithms are briefly described, as well as the prospects for their application for the modern optical systems design.

Keywords: neural networks, artificial intelligence, optical system, design.

*Адрес для переписки: Шанчук В. А., ул. Макаенка 25, г. Минск, 220114, Республика Беларусь
e-mail: vdmisacnewera@gmail.com*

Введение. Проектирование оптических систем – сложный итерационный процесс, требующий глубоких знаний в различных областях оптики и значительных временных, а также вычислительных затрат. С развитием оптических приборов появилась необходимость создания компактных, высокопроизводительных и специализированных оптических систем, что побуждает находить и развивать новые методы проектирования оптических систем на основе искусственного интеллекта (ИИ). Различные методы и виды машинного обучения и глубоких нейронных сетей открывают новые возможности для ускорения разработки и оптимизации различных оптических приборов и компонентов.

Области применения ИИ. На сегодняшний день основным направлением является применение ИИ для оптимизации параметров различных видов оптических систем. Традиционные методы проектирования часто требуют сложных итерационных вычислений, тогда как алгоритмы ИИ могут быстро анализировать большие объемы

данных и находить оптимальные решения. Например, нейронные сети успешно применяются для моделирования голографических элементов и метаповерхностей [1].

Одно из ключевых развивающихся направлений – использование машинного обучения для автоматического проектирования оптических линз. ИИ позволяет автоматизировать процесс выбора геометрии и параметров линзы, сокращая временные затраты и снижая количество проводимых итерационных вычислений. Также нейронные сети могут использоваться для быстрого синтеза базовых оптических систем, которые являются хорошей основой для последующей их оптимизации в специализированном программном обеспечении и доведения до состояния рабочего варианта системы, удовлетворяющего предъявляемым к нему требованиям [2].

Также нейронные сети начинают применять в тех случаях, когда инженеру-оптику необходимо выбрать ряд материалов, которые будут использоваться для расчета оптической системы

с определенными требованиями, которые могут ограничивать использование определенных видов материалов. Алгоритмы на основе нейронных сетей могут быстро осуществлять поиск по большим базам данных и предлагать наиболее оптимальные материалы для оптических компонентов [3].

В настоящее время нейронные сети также применяются для быстрого анализа чувствительности оптических систем к ошибкам изготовления и сборки, а также к ошибкам, возникающим вследствие воздействия внешних сил. Обычно анализ допусков включает последовательное изменение ряда параметров (радиусы кривизны, наклоны оптических элементов вокруг произвольных осей, осевые расстояния и т.д.) и проведение моделирования, что требует больших вычислительных и временных затрат. Машинное обучение позволяет выявить взаимосвязь между изменением определенных параметров и снижением производительности, позволяя практически мгновенно оценивать допуски. Это позволяет инженерам-оптикам быстро определить, какие допуски являются критичными, а какие – допустимыми. Анализ допусков на основе ИИ также может учитывать множество источников ошибок одновременно, давая более целостную картину надежности системы, чем ручные методы вычислений и анализа [4].

Таблица 1 – Основные типы нейронных сетей

Тип нейронной сети	Краткое описание алгоритма работы	Область применения
Оптические нейронные сети (ONN)	Физическая реализация нейронной сети, в которой для вычислений используются фотоны вместо электронов	Проектирование сложных оптических элементов (сверхширокополосные фильтры и т. п.)
Многослойные перцептроны (MLP)	Преобразование набора входных данных в выходные данные с нужными параметрами путем аппроксимации сложных нелинейных функций	Проектирование метаповерхностей, волноводов, линз, оптических фильтров
Сверточные нейронные сети (CNN)	Автоматическое и иерархическое извлечение признаков из данных с сеточной структурой	Цифровая голография, обработка оптических изображений

Нейронные сети могут применяться для построения суррогатных моделей. Суррогатная модель – быстрое и понятное приближение к физическому моделированию. Обучаясь на данных моделирования оптических систем, нейронные сети могут прогнозировать их производительность (например, пятна рассеяния, коэффициенты

отражения поверхностей и т. д.) гораздо быстрее, чем при трассировке лучей или расчетах с использованием волновой оптики. Это позволяет оценивать оптические характеристики различных моделей оптических систем с минимальными трудозатратами, значительно ускоряя процесс проектирования. Таким образом, суррогатное моделирование позволяет инженерам-оптикам оценивать допуски и оптимизировать параметры в несколько раз быстрее, чем при использовании классических методов [5].

Также стоит упомянуть использование нейронных сетей для проектирования оптических систем, содержащих компоненты из нелинейных оптических материалов [6].

Типы нейронных сетей. Основные типы нейронных сетей, которые могут применяться для проектирования оптических систем, приведены в таблице 1.

Несмотря на стремительное развитие алгоритмов на основе нейронных сетей, существует ряд ограничений и вызовов, которые еще предстоит решить. Например, оптические нейронные сети (ONN) достаточно сложно обучать и калибровать из-за технологической сложности системы. Многослойные перцептроны (MLP), как программные модели, имеют высокое энергопотребление и их скорость ограничена тактовой частотой процессора, а также величиной памяти. Сверточные нейронные сети (CNN), как программные модели, имеют низкое быстродействие. Однако, алгоритмы на основе нейронных сетей постоянно совершенствуются и существует большая вероятность того, что в ближайшем будущем большинство недостатков будет устранено или их влияние будет сведено к минимуму.

Заключение. Существующие на сегодняшний день типы нейронных сетей и алгоритмы на их основе позволяют инженерам-оптикам проектировать широкий ряд оптических систем, обладающих высокой производительностью, с высокой скоростью и минимальными трудозатратами.

Литература

1. Duan, B. Deep Learning for Photonic Design and Analysis: Principles and Applications / B. Duan [et al.] // *Frontiers in Materials*. – 2021. – Vol. 8. – Art. 791296.
2. Yow, A. P. Artificial intelligence in optical lens design / A. P. Yow [et al.] // *Artificial Intelligence Review*. – 2024. – Vol. 57. – Art. 193.
3. AI Optical System Design // Yenra: [сайт]. – URL: <https://yenra.com/ai20/optical-system-design> (date of access: 20.09.2025).
4. Shi, H. Deep Learning for Polarization Optical System Automated Design / H. Shi [et al.] // *Photonics*. – 2024. – Vol. 11, № 2. – Art. 164.
5. Design of Planar Multilayer Devices for Optical Filtering Using Surrogate Model Based on Artificial Neural Network / D. F. Rêgo [et al.] // *Optics*. – 2024. – Vol. 5, № 1. – P. 121–132.
6. Mondal, S. Machine learning guided discovery of Non-Linear Optical materials / S. Mondal, R. Hammad // *ChemRxiv*. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-k4rsz> (date of access: 20.09.2025).

УДК 535.317

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА

Шевченко В. П., Артюхина Н. К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены особенности проектирования и результаты расчета оптической системы цифрового автоколлиматора.

Ключевые слова: автоколлиматор, цифровой, оптическая система, фокусное расстояние, хроматизм.

DESIGN OF AN OPTICAL SYSTEM FOR A DIGITAL AUTOCOLLIMATOR

Shevchenko V. P., Artyukhina N. K.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The design features and calculation results of the optical system of a digital autocollimator are presented.

Keywords: Autocollimator, digital, optical system, focal length, chromatic aberration.

Адрес для переписки: Шевченко В. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: shevchenko.varvara2002@mail.ru.

Оптические системы, проектирующие изображение объекта при помощи отражающей поверхности в плоскость самого объекта, называются автоколлимационными. Автоколлиматоры используют в различных схемах контроля угловых параметров деталей. На предприятиях автоколлиматоры применяют в метрологических лабораториях и центрах сертификации, в основном, для калибровки и поверки образцовых угловых мер и различных устройств, созданных на их основе. Угловые измерения при этом характеризуются высокой точностью, достигающей сотых долей угловой секунды. Цифровые автоколлиматоры предназначены для проверки точности оптических систем, выравнивания и контроля позиционирования оптических компонентов, установки лазерных систем и решения иных задач. Цифровые автоколлиматоры обладают высокой точностью и чувствительностью, что делает их важным инструментом в областях, где требуется высокоточное измерение углов и ориентации. Схема включает осветитель, конденсор, марку, светоделитель, объектив и автоколлимационное зеркало, матричный фотоприемник с блоком цифровой обработки изображения, причем марка и матричный фотоприемник установлены в фокальной плоскости объектива.

В ходе изучения существующих моделей автоколлиматоров были проанализированы достоинства и недостатки существующих разработок и поставлены цели по модернизации базового прибора, в частности, по замене ФПУ, осветителя, разработке юстировочного устройства для обеспечения плавной и точной настройки положения ФПУ, осветителя, а также совершенствованию оптики цифрового коллиматора.

Цель работы – определить особенности проектирования оптической системы цифрового коллиматора и представить результаты габаритного и абберационного расчетов.

Базовая схема оптики цифрового автоколлиматора представлена на рисунке 1.

К особенностям проектирования оптической системы автоколлиматора отнесем выбор

объектива приемного канала, анализ методик расчета, исследование требуемых комбинаций стекол.

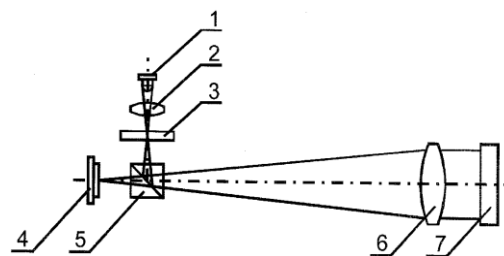


Рисунок 1 – Оптическая схема цифрового автоколлиматора

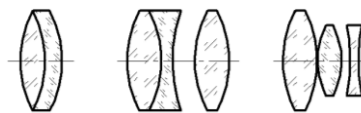


Рисунок 2 – Простые ахроматические объективы

Исследованы простые ахроматические объективы (рисунок 2), использована при этом известная методика Слюсарева Г. Г. Простые двлинзовые объективы при относительном отверстии порядка 1:3, углом поле до 10° и диаметре входного зрачка до 120 мм устраняют первичную сферическую абберацию и кому, а при надлежащем подборе материалов линз и первичный хроматизм. В треллинзовых объективах основные абберации устраняются для больших угловых полей.

Для треллинзового объектива был использован метод разделенных переменных [1]. Уравнения для хроматизма положения, сферической абберации и меридиональной комы, соответственно C , P , W взяты по модульному принципу для треллинзового несклеенного объектива, а затем преобразован для каждой модификации.

На первом этапе определены внешние параметры из условий масштаба

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1$$

и уравнения ахроматизации

$$\varphi_1/v_1 + \varphi_2/v_2 + \varphi_3/v_3 = -\bar{C} = 0.$$

Рассчитаны оптические силы линз бесконечно тонкого объектива для $f^* = 1$ и нормировке первого вспомогательного луча:

$$\alpha_1 = 0; h_1 = f^* = 1; \alpha_7 = 1.$$

Тогда:

$$\alpha_3 = \varphi_1; \alpha_5 = \varphi_1 + \varphi_2.$$

На втором этапе определялись внутренние параметры: α_2 , а затем α_4 и α_6 из условий исправления сферической аберрации и комы, т. е.

$$P^\infty = 0, W^\infty = 0.$$

Из условия $W^\infty = 0$ определена связь углов α_6 и α_4 .

Расчет исходного варианта проведен с использованием полученного алгоритма. При этом использованы различные комбинации стекол, например марок ЛКЗ – ЛКЗ – ТФ5. После перехода от тонких компонентов к реальным линзам конструктивные параметры объектива меняются [2].

В процессе исследования линзовых объективов создан ряд оптимизационных компьютерных модулей по различным параметрам: геометрическим аберрациям, пятну рассеивания и др. в программной среде OpticStudio.

Особенностью проектирования данной оптической системы являлся подбор новых стекол.

Сравнение оптического стекла по коэффициенту преломления (n_d) и числу Аббе (V_d). При совпадении коэффициентов преломления или имеющих незначительное отклонение, принимаем эти стекла (Китай) как эквивалентные или близкие к стеклу каталога SCHOTT (таблица 1).

Новые стекла, подобранные для объектива, уступают в качестве, более экономичны и выгодны в производстве.

Рассчитанный объектив (базовая система) состоит из двух компонентов.

Склейка:

Двояковыпуклая линза с радиусами $r_1 = 139,96$ мм и $r_2 = -200,40$ мм. Осевые расстояния $d = 8$ мм. Марка стекла – N-LAK7 с показателем преломления 1,649870.

Двояковогнутая линза с радиусами $r_1 = -200,40$ мм и $r_2 = 975,0$ мм. Осевые расстояния $d = 6$ мм. Марка стекла – N-LAF7 с показателем преломления 1,746254.

Плоско-вогнутая линза с радиусами $r_1 = -70,47$ мм и $r_2 = 293,8$ мм. Осевые расстояния $d = 4$ мм. Марка стекла – N-FK5 с показателем преломления $n = 1,486401$.

Таблица 1 – Сравнение стекол

Стекло	n_d	V_d	Стекло	n_d	V_d
N-LAK7	1,65160	58,52	H-LaK50A	1,6516	58,4
N-LAF7	1,74950	34,82	H-LaF4	1,7495	34,99
N-FK5	1,48749	70,41	H-QK3L	1,48749	70,44

Характеристики объектива даны в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики объектива

Наименование параметра	Численное значение
Фокусное расстояние	1000 мм
Относительное отверстие	1:20
Диаметр входного зрачка	50 мм
Угловое поле зрения в пространстве предметов	10°
Рабочая длина волны	600±20 нм

На основе анализа качества рассчитанного объектива, величин остаточных аберраций и технологичности объектива делается заключение о возможности использования объектива в цифровом коллиматоре.

Литература

1. Апенко, М. И. Задачник по прикладной оптике / М. И. Апенко. – М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
2. Артюхина, Н. К. Теория и расчет оптических систем / Н. К. Артюхина. – Мн.: Техническая литература, 2020. – 264 с.

УДК 550.34.013.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕТОДИОДНОЙ ФАРЕ

Шейко А. Г., Артюхина Н. К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены особенности проектирования и результаты теплового расчета

Ключевые слова: тепловое моделирование, светодиодная фара, распределение температуры, конструктивная оптимизация, теплоотвод, охлаждение.

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN AN LED HEADLIGHT

Sheika A. G., Artyukhina N. K.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The design features and the results of thermal calculation are presented.

Keywords: thermal modeling, LED headlight, temperature distribution, structural optimization, heat sink, cooling.

Адрес для переписки: Шейко А. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: sheikolanton@gmail.com.

В современном мире проектирования фар есть необходимость в разработке высокоэффективных, но в тоже время надежных конструкций, поэтому инженеры стремятся достичь максимального

результата при наименьших затратах. В этом случае возникает задача совершенствования светотехнических, схмотехнических, конструкторских, а также технологических методов разработки.

В такой ситуации более острой становится проблема теплоотвода от мощных компонентов электронного модуля, так как при уменьшении габаритов конструкции доля нагретой области относительно общего объема корпуса возрастает, что может негативно повлиять на стабильность работы устройства и его тепловую устойчивость.

Чтобы избежать подобных проблем, уже на этапе проектирования следует предусмотреть эффективную систему охлаждения. Такие системы делятся на пассивные и активные. Пассивное охлаждение осуществляется с помощью неподвижных элементов – радиаторов, тепловых трубок и других теплоотводящих компонентов. Активные системы, напротив, включают в себя подвижные механизмы, например, вентиляторы. Выбор конкретного метода теплоотвода определяется мощностью используемых компонентов, конструктивными ограничениями и условиями эксплуатации устройства.

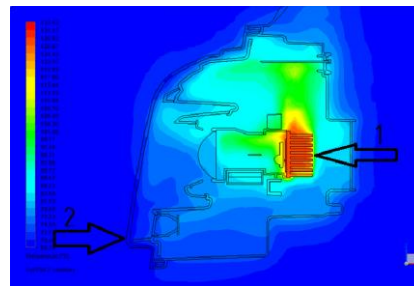
Улучшение оптических характеристик автомобильной светодиодной фары требует повышения эффективности теплоотвода и охлаждения, особенно в условиях снижения ее массогабаритных параметров. Компактные конструкции ограничивают возможности естественного рассеивания тепла, что приводит к усложнению системы терморегуляции. В результате возрастает необходимость применения как пассивных, так и активных методов охлаждения. Эффективная теплозащита становится ключевым фактором не только для обеспечения стабильной работы светодиодов, но и для предотвращения запотевания, снижения риска термического старения материалов и повышения общей надежности устройства.

Цель работы – выявить зоны максимальных и минимальных температур в светодиодной фаре, чтобы предотвратить перегрев электронных компонентов и запотевание [1]. Ключевыми вопросами в ходе проведения термического расчета являются: где находятся зоны перегрева; есть ли риск термического повреждения или запотевания.

Выбор оптимального метода предоставления поверхности свободной формы в термическом моделировании играет критическую роль, особенно при наличии локальных зон перегрева. Разные подходы к геометрическому описанию влияют не только на точность расчета термических градиентов и эффективность трассировки тепловых потоков, но и определяют степень детализации, необходимую для корректной идентификации «горячих точек». Более гибкие методы позволяют точнее учитывать сложные контуры корпуса и локальные особенности теплообмена, что важно для оптимизации конструкции и предотвращения перегрева ключевых компонентов.

Однако для повышения точности расчета и эффективности оптимизации в термосимуляции система задается таким образом, что теплоотводящие элементы рассматриваются как первичные приемники тепловой энергии, а источники тепла – как вто-

ричные, направленные на них. Такой подход позволяет более точно оценить распределение температур, выявить зоны перегрева (см. рисунок 3) и подобрать оптимальные параметры охлаждения.



1 – самое горячее место в фаре; 2 – самое холодное место в фаре [2]

Рисунок 1 – Распределение скорости воздушных потоков, формирующихся во внутреннем пространстве фары из-за естественной конвекции

Учитывая сложность тепловых процессов и большое количество взаимодействующих температурных полей, было принято решение использовать обратный подход к моделированию. В реальных условиях источником тепла являются светодиоды (см. рисунок 2), а корпус фары служит средой для его рассеивания.

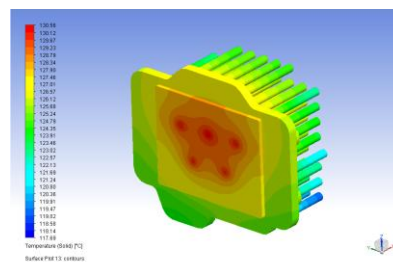


Рисунок 2 – Реальный источник тепла

На основе результатов термосимуляции, представленных на рисунках 2 и 3, можно сделать вывод, что геометрическая конфигурация источника тепла оказывает значительное влияние на распределение температур в корпусе фары. В реальной системе (рисунок 2) тепло концентрируется вблизи светодиодных элементов, что приводит к локальному перегреву, особенно при недостаточном теплоотводе. На рисунке 3 четко выделены зоны перегрева, где температура превышает допустимые значения для материалов корпуса.

На основании анализа зон перегрева были предложены следующие меры по оптимизации конструкции:

Модификация геометрии корпуса: увеличение площади контакта между источником тепла и радиатором, устранение застойных зон воздуха.

Применение высокоэффективных теплопроводящих материалов: использование термопрокладок с высокой теплопроводностью, графитовых пленок и алюминиевых сплавов.

Интеграция активного охлаждения: установка компактных вентиляторов в области максимального тепловыделения, как показано в предыдущей симуляции.

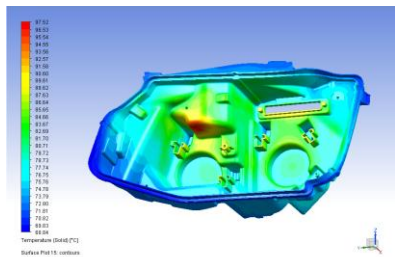


Рисунок 3 – Зоны перегрева

Улучшение теплообмена с окружающей средой: оптимизация формы ребер радиатора, ориентация корпуса для усиления естественной конвекции.

Проведенное моделирование подтвердило, что выбор метода геометрического представления и подход к построению модели существенно влияют на точность термического анализа. Обратное моделирование, ориентированное на зоны теплоотвода, позволяет более точно локализовать зоны перегрева и повысить эффективность оптимизации конструкции. Внедрение предложенных решений способствует снижению температуры в критических точках, увеличению срока службы компонентов и повышению надежности всей системы.

Литература

1. Запотевшая фара: лечить или менять // ZR: [сайт]. – URL: <https://www.zr.ru/content/articles/906921-zapotevshaya-fara-v-chem-prichina/> (дата обращения: 01.09.2025).
2. Устранение запотевания фары // Headlamp61: [сайт]. – URL: <https://headlamp61.ru/lamp> (дата обращения: 15.08.2025).

УДК 621.373.826

СИСТЕМА РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ Шишко Т. А., Кисель В. Э., Лазарчук А. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена система регенеративного усиления чирпированных фемтосекундных лазерных импульсов, позволяющая получать лазерные импульсы с пиковой мощностью >1 ГВт и длительностью около 145 фс при частоте следования 20 кГц. Данная система предназначена для прецизионной обработки широкого спектра материалов, в том числе не допускающих нагрева, а также другие приложения, требующие высокой пиковой мощности и частоты повторения импульсов.

Ключевые слова: регенеративный усилитель, фемтосекундные импульсы, диодная накачка, усиление чирпированных импульсов.

CHIRPED PULSE REGENERATIVE AMPLIFIER BASED ON $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ CRYSTAL Shishko T. A., Lazarchuk A. I., Kisel V. E.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The regenerative amplifier of chirped femtosecond pulses, delivering a laser pulses with peak power more than 1 GW and duration near to 145 fs with in 20KHz repetition rate. This system is applicable for prescigion material processing, also with materials that destroys with heat, and other applications which need high repetition rate and intensity.

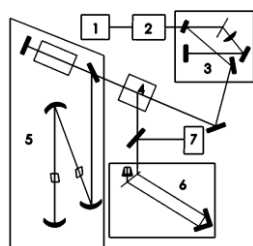
Keywords: regenerative amplifier, femtosecond pulses, diode pumping, chirped pulse amplification.

*Адрес для переписки: Кисель В. Э., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: vekisel@bntu.*

Введение. В последние десятилетия наблюдается значительное развитие в области лазеров ультракоротких импульсов. Фемтосекундные лазерные системы становятся более компактными, надежными и коммерчески доступными. Границы применений ультракоротких импульсов стремительно увеличиваются. Кристаллы, легированные ионами Yb^{3+} имеют интенсивные полосы поглощения в спектральной области 980 нм, что позволяет использовать в качестве источников накачки не дорогих, коммерчески доступных InGaAs лазерных диодов, имеющие большой диапазон выходных мощностей (до нескольких кВт) в непрерывном режиме. Широкие полосы усиления ионов Yb^{3+} допускают получение импульсов

фемтосекундной длительности. Низкий квантовый дефект (разность энергий квантов накачки и генерации) обеспечивает низкое тепловыделение в активном элементе (длина волны накачки 980 нм, генерации – 1020–1050 нм), что позволяет реализовать эффективные лазерные системы с высокой средней выходной мощностью. Результатом данной работы было создание системы регенеративного усиления чирпированных фемтосекундных импульсов с высокой частотой следования (20 кГц), высокой энергией импульсов (до 204 мкДж), малой длительностью импульсов (около 145 фс), использующей в качестве источников накачки коммерчески доступные, экономичные InGaAs лазерные диоды.

Система регенеративного усиления. В данной работе представлены экспериментальные результаты разработки регенеративного усилителя фемтосекундных лазерных импульсов. Схема усиления реализована на основе двух кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Yb}:\text{KGW}$) с диодной накачкой в области 980 нм. Схема разработанной системы регенеративного усиления представлена на рисунке 1. Излучение задающего лазера 1 проходит изолятор Фарадея 2, для предотвращения попадания обратного отражения излучения в задающий лазер. Для эффективного усиления лазерные импульсы растягиваются во времени в стретчере 3 на основе пропускающей дифракционной решетки и попадают в усилитель 5. Изолятор Фарадея 4 выполняет роль циркулятора и разделяет входной затравочный и выходной усиленный импульсы. В компрессоре 6 происходит сжатие усиленного импульса.



1 – задающий лазер; 2, 4 – изолятор Фарадея;
3 – стретчер; 5 – резонатор усилителя; 6 – компрессор;
7 – блок измерительного оборудования

Рисунок 1 – Схема разработанной системы

В качестве источника затравочных импульсов используется разработанный в лаборатории иттербиевый волоконный лазер со средней выходной мощностью до 100 мВт на частоте следования 65 МГц и длительностью импульса 100 фс. Параметры задающего лазера представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики задающего лазера

Энергия импульса, нДж	Длительность импульса, пс	Частота следования импульсов, МГц	Спектральная ширина импульса, нм	M^2
0,5	>75	65	19	<1,1

Автокорреляционная функция и спектр падающего в усилитель растянутого во времени импульса показаны на рисунке 2 и 3 соответственно. В качестве активной среды использовались два кристалла $\text{Yb}:\text{KGW}$ усиливающих излучение по разным оптическим осям, что позволило компенсировать эффект сужения спектральной полосы при усилении. Для продольной накачки активных элементов использовались лазерные InGaAs диоды мощностью 30 Вт с волоконным выходом, диаметр волокна 105 мкм.

На рисунке 4 показана автокорреляционная функция сжатого усиленного импульса, длительность составила 145 фс. Зависимость выходной мощности от падающей мощности накачки представлена на рисунке 5. Максимальная энергия

сжатого импульса при частоте следования 20 МГц составила 204 мкДж, что соответствует средней выходной мощности более 4 Вт и пиковой мощности одиночного импульса более 1,4 ГВт.

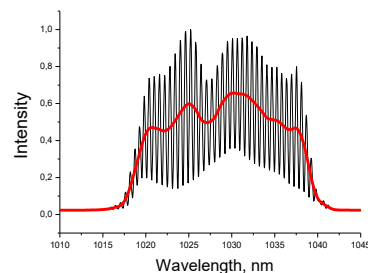


Рисунок 2 – Спектр падающего импульса и его огибающая

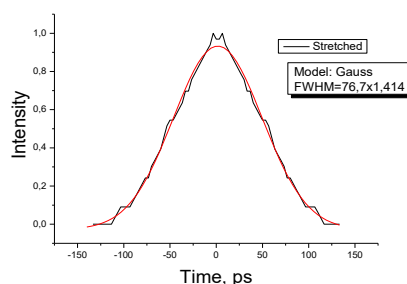


Рисунок 3 – Автокорреляционная функция длительности растянутого импульса

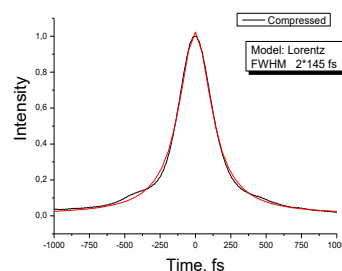


Рисунок 4 – Автокорреляционная функция после усиления

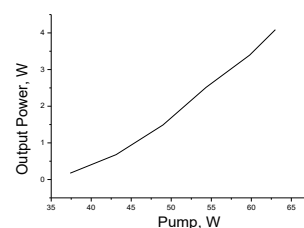


Рисунок 5 – Зависимость выходной мощности от падающей накачки

Заключение. Представлена система регенеративного усиления chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов, позволяющая получать лазерные импульсы с пиковой мощностью более 1 ГВт и длительностью около 145 фс при частоте следования 20 кГц. Данную систему планируется использовать для прецизионных материалов, а также для других практических приложений, требующих короткой длительности импульсов их высокой пиковой мощности и частоты повторения.

УДК 535.37;620.3

АП-КОНВЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ- И ЛЮТЕЦИЙ-АЛЮМИНИЕВЫХ ГРАНАТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ

Юмашев К. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы ап-конверсионные свойства нанокристаллов иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов, содержащих ионы европия и иттербия, в видимой области спектра. Предложен механизм наблюдаемой ап-конверсионной люминесценции. Определены эффективность и скорость переноса энергии от ионов иттербия к ионам европия.

Ключевые слова: нанокристаллы, ионы европия и иттербия, ап-конверсионная люминесценция, перенос энергии.

AP-CONVERSION PROPERTIES OF YTTRIUM- AND LUTETIUM-ALUMINUM GARNET NANOCRYSTALS DOPED WITH YTTERBIUM AND EUROPIUM IONS

Yumashev K. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The up-conversion properties of yttrium-aluminum and lutetium-aluminum garnet nanocrystals containing europium and ytterbium ions were studied in the visible. A mechanism for the observed up-conversion luminescence was proposed. The efficiency and rate of energy transfer from ytterbium ions to europium ions were determined.

Keywords: nanocrystals, europium and ytterbium ions, up-conversion luminescence, energy transfer.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

В настоящей работе представлены результаты исследования ап-конверсионных свойств нанокристаллов иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого гранатов, активированных ионами иттербия и европия ($\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Данные материалы являются перспективными средами для реализации ап-конверсионных материалов красной области спектра.

На рисунке 1 представлены спектры ап-конверсионной люминесценции образцов $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ в видимой области спектра. Возбуждение осуществлялось в полосу поглощения $^2\text{F}_{7/2} \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ ионов иттербия Yb^{3+} на длине волны 960 нм (волновое число $10\,417\text{ см}^{-1}$) излучением лазерного диода InGaAs. Наблюдаемые полосы люминесценции связаны с переходами из метастабильного возбужденного состояния $^5\text{D}_0$ в состояния $^7\text{F}_J$ ($J = 0, 1, 2, 3, 4$) иона европия Eu^{3+} . Полосы при $17\,391$ ($17\,404$) см^{-1} (575 нм), $16\,996$ ($16\,985$) см^{-1} (588 (589) нм), $16\,242$ ($16\,252$) см^{-1} (616 (615) нм), $15\,422$ ($15\,459$) см^{-1} (648 (647) нм), $14\,237$ ($14\,259$) см^{-1} (702 (701) нм) относятся к переходам $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_0$, $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$, $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$, $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$, $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ соответственно. Здесь и в дальнейшем данные в скобках приводятся для образца $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, а без скобок – для образца $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

Переход $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_0$ запрещен правилами отбора, и эта полоса крайне слабая. Полоса $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ содержит два локальных пика при $17\,037$ ($17\,030$) см^{-1} (587.0 ($587,2$) нм) и $16\,879$ (6894) см^{-1} (592.5 ($591,9$) нм). Для полосы $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ наблюдаются два локальных пика при $16\,512$ ($16\,519$) см^{-1} (605.6 ($605,4$) нм) и $15\,966$ ($15\,952$) см^{-1} (626.3 ($626,9$) нм). Для полосы $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$ для обоих

образцов наблюдаются слабые пики при $15\,497\text{ см}^{-1}$ ($645,3$ нм) и $15\,352\text{ см}^{-1}$ ($651,4$ нм). Полоса $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ расщепляется на три локальных пика при $14\,178$ ($14\,167$) см^{-1} ($705,3$ ($705,9$) нм), $14\,363$ ($14\,346$) см^{-1} ($696,2$ ($697,1$) нм) и $14\,457$ ($14\,446$) см^{-1} ($691,7$ ($692,2$) нм).

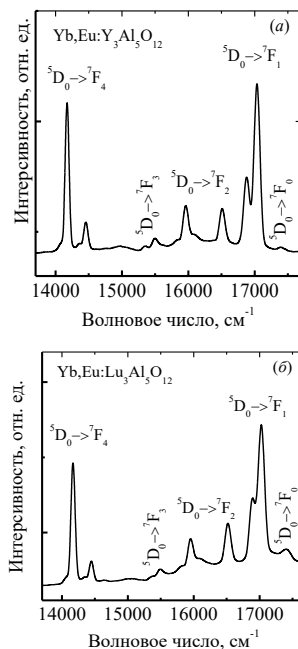


Рисунок 1 – Спектры ап-конверсионной люминесценции образцов (а) $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и (б) $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

Люминесценция ионов иттербия Yb^{3+} (переход $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$) для исследуемых образцов наблюдается в спектральной области $9350\text{--}10\,100\text{ см}^{-1}$

(996–1070 нм). Для образца $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ доминирует интенсивный пик при 9661 см^{-1} (1035 нм, а для образца $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – при 9706 см^{-1} (1030 нм).

Эффективность η_{ET} кооперативного переноса энергии $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ можно определить с помощью выражения [1]

$$\eta_{\text{BT}} = 1 - \frac{\tau_{\text{Yb Eu}}}{\tau_{\text{Yb}}}, \quad (1)$$

где τ_{Yb} – время жизни в возбужденном состоянии ионов иттербия Yb^{3+} для образца, активированного только ионами Yb^{3+} , а $\tau_{\text{Yb Eu}}$ – время жизни в возбужденном состоянии ионов Yb^{3+} для образца, со-активированного ионами иттербия Yb^{3+} и европия Eu^{3+} . Ионы иттербия рассматриваются в качестве доноров, передающих энергию ионам-акцепторам европия. Времена жизни τ_{Yb} и $\tau_{\text{Yb,Eu}}$ определены путем измерения кинетики затухания люминесценции ионов иттербия для соответствующих образцов. Возбуждение люминесценции производилось на длине волны 960 нм (волновое число $10\,417 \text{ см}^{-1}$), а регистрация – на длине волны 1035 нм (волновое число $9\,662 \text{ см}^{-1}$) для образца $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и на длине волны 1030 нм (волновое число $9\,709 \text{ см}^{-1}$) для образца $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Кинетика затухания люминесценции не является моноэкспоненциальной и может быть описана двухэкспоненциальной функцией:

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) = I_{10}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_{20}e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (2)$$

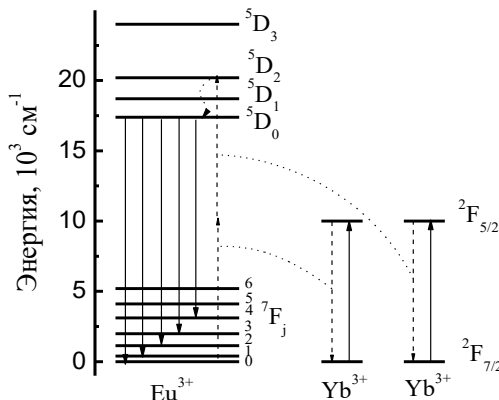


Рисунок 2 – Схема уровней энергии ионов Eu^{3+} и Yb^{3+} с указанием люминесцентных переходов и $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_j$ иона Eu^{3+} и предложенного механизма переноса энергии $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$

В таблице 1 приведены значения времен быстрой τ_1 и медленной τ_2 компонент затухания люминесценции, а также относительный вклад A_1 быстрой компоненты затухания в общую интенсивность люминесценции, рассчитанный по формуле:

$$A_1 = \frac{\int I_1(t) dt}{\int I(t) dt} = \frac{I_{10}e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{I_{10}\tau_1 + I_{20}\tau_2}. \quad (3)$$

Таблица 1 – Параметры τ_1 , τ_2 , A_1 и $\tau_{\text{ср}}$ кинетики затухания люминесценции иона Yb^{3+}

	τ_1 , мс	τ_2 , мс	A_1 %	$\tau_{\text{ср}}$, мс
$\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	0,047	0,28	11	0,25
$\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	0,046	0,19	21	0,17
$\text{Yb:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	0,044	0,26	11	0,24
$\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	0,035	0,21	6,5	0,19

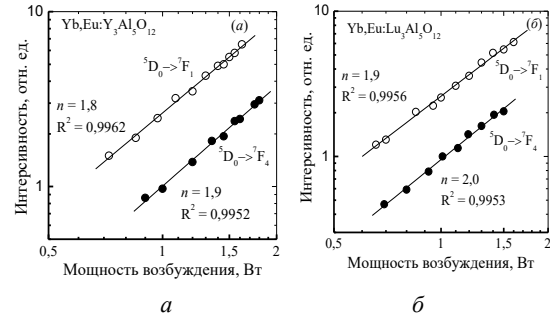


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности ап-конверсионной $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ и $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ люминесценции IUCL ионов Eu^{3+} от мощности возбуждения P (в логарифмическом масштабе) для образцов (а) $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и (б) $\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Длина волны возбуждения 960 нм (волновое число $10\,417 \text{ см}^{-1}$). Точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация экспериментальных зависимостей функцией $\text{IUCL} \sim P^n$

Быструю компоненту τ_1 затухания можно связать с ионами иттербия, находящимися в аморфной фазе и дефектах кристаллической решетки, а медленную компоненту τ_2 затухания отнести к ионам иттербия в нанокристаллах. Если для оценки эффективности η_{ET} переноса энергии в выражении (1) использовать значения медленных компонент затухания люминесценции, то получаем $\eta_{\text{ET}} = 32 \%$ ($\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и 19% ($\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Если же использовать значения средних времен затухания люминесценции (см. таблицу 1), то эффективность $\eta_{\text{ET}} = 30 \%$ ($\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и 21% ($\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) [средние значения средних времен затухания определены, исходя из математического определения среднего значения функции, как $\tau_{\text{ср}} = \int t I(t) dt / \int I(t) dt$]. Полученные значения эффективности η_{ET} переноса энергии близки (32 % и 30 %; 19 % и 21 %). Оценка скорости переноса энергии $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ с использованием выражения (4) дает $p_{\text{ET}} = 1,7$ (0,92) мс^{-1} в первом случае и 1,8 (1,1) мс^{-1} – во втором случае для образцов $\text{Yb,Eu:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{Yb,Eu:Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Предложенный механизм ап-конверсионной люминесценции подтверждается полученной зависимостью интегральной интенсивности I_{UCL} апконверсионной люминесценции ионов европия Eu^{3+} от мощности возбуждения P ионов иттербия (рис. 3). Возбуждение люминесценции осуществлялось на длине волны 960 нм (волновое число $10\,417 \text{ см}^{-1}$), а регистрация – в спектральных диапазонах, соответствующих переходам $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ и $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ ионов европия (рисунок 1). Из данных рисунка 3 следует, что интенсивность $I_{\text{UCL}} \sim P^n$, где значение n близко к 2. Это свидетельствует о том, что в процесс

возбуждения ап-конверсионной люминесценции ионов европия вовлечены два фотона, то есть, подтверждая тем самым двухфотонный механизм возбуждения данной люминесценции [2].

$$\rho_{BT} = \frac{1}{\tau_{YbEu}} - \frac{1}{\tau_{Yb}} \quad (4)$$

УДК 535.37

ФТОР-ФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА С ИОНАМИ Yb³⁺ И Ho³⁺ КАК ЭФФЕКТИВНЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ В ЖЕЛТО-ЗЕЛЕННОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ясюкевич А. С.¹, Колобкова Е. В.², Кисель В. Э.¹

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Изучены спектроскопические характеристики фтор-фосфатных стекол с малым содержанием фосфатов, соактивированных ионами Yb³⁺ и Ho³⁺, проанализированы механизмы переноса энергии между ионами иттербия и гольмия, изучены характеристики этих стекол как люминофоров в желто-зеленой области спектра.

Ключевые слова: ионы гольмия, ионы иттербия, перенос энергии, ап-конверсионная люминесценция.

FLUOROPHOSPHATE GLASSES WITH Yb³⁺ AND Ho³⁺ IONS AS EFFECTIVE LUMINOPHORS IN THE YELLOW-GREEN SPECTRAL REGION

Yasukevich A.S.¹, Kolobkova E.V.², Kisel V.E.¹

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The spectroscopic characteristics of fluorophosphate glasses with a low content of phosphates codoped with Yb³⁺ and Ho³⁺ ions were studied, the mechanisms of energy transfer between ytterbium and holmium ions were analyzed, and the characteristics of these glasses as phosphors in the yellow-green region of the spectrum were studied.

Keywords: holmium ions, ytterbium ions, energy transfer, up-conversion luminescence.

Адрес для переписки: Ясюкевич А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Конверторы света из инфракрасной (ИК) в видимую области спектра привлекают значительный интерес благодаря широкому кругу потенциальных применений, например, в системах отображения информации, в твердотельных лазерах, в медицине и т. д. Кристаллы и стекла, соактивированные ионами Yb³⁺ и Ho³⁺, рассматриваются как эффективные ап-конверсионные (АК) преобразователи света в желто-зеленую область при их возбуждении в линию поглощения ионов иттербия.

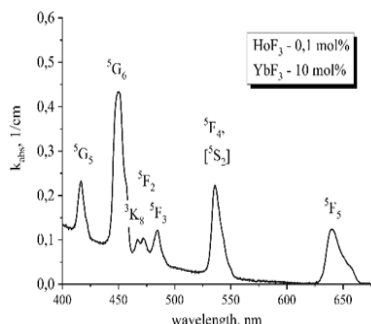


Рисунок 1 – Спектр поглощения стекла Gl 1 в области 400 нм–675 нм

Литература

1. Miritello, M. Energy transfer and enhanced 1.54 μm emission in Erbium-Ytterbium disilicate thin films / M. Miritello [et al.] // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, № 21. – P. 20761–20772.
2. Pollnau, M. Power dependence of upconversion luminescence in lanthanide and transition-metal-ion systems / M. Pollnau [et al.] // Physical Review B. – 2000. – Vol. 61, № 5. – P. 3337–3346.

В данной работе представлены результаты исследования спектроскопических характеристик фтор-фосфатных стекол, синтезированных в стеклообразующей системе Ba(PO₃)₂, BaF₂, AlF₃, CaF₂, MgF₂, SrF₂, YbF₃ и HoF₃. В таблице 1 указаны концентрации ионов иттербия и гольмия и молярное содержание фторидов этих ионов в исследуемых стеклах.

Таблица 1 – Содержание YbF₃ и HoF₃ и концентрации ионов иттербия и гольмия в стеклах Gl 1 - Gl 5

	YbF ₃ , мол %	HoF ₃ , мол %	N _{Yb} , 1/см ³	N _{Ho} , 1/см ³
Gl 1	10,0	0,1	20,3 10 ²⁰	2 10 ¹⁹
Gl 2	8,0	0,1	17,0 10 ²⁰	2 10 ¹⁹
Gl 3	5,0	0,1	10,2 10 ²⁰	2 10 ¹⁹
Gl 4	4,0	0,1	8,20 10 ²⁰	2 10 ¹⁹
Gl 5	2,0	0,1	4,10 10 ²⁰	2 10 ¹⁹

На рисунке 1 представлен фрагмент спектра поглощения ионов гольмия при переходах с основного уровня ⁵I₈ на уровни с более высокой энергией. Эти результаты были использованы в дальнейшем для построения схемы энергетических уровней иона гольмия.

Были также зарегистрированы спектры АК люминесценции ионов гольмия при возбуждении

образцов стекол в линию поглощения ионов иттербия излучением лазерного диода (ЛД) на длине волны ~ 970 нм, см. рисунок 2.

Число фотонов возбуждающего излучения n , которое необходимо для заселения высокорасположенных уровней ионов гольмия в стационарных условиях, определяется при изучении зависимости мощности ап-конверсионной люминесценции P_{lum} ионов Ho^{3+} (акцепторов) от мощности возбуждающего излучения P_{pump} ионов Yb^{3+} (доноров) в двойной логарифмической шкале $\ln(P_{lum}) = n \ln(P_{pump}) + const$. Такие исследования проводятся при малой мощности возбуждающего излучения для предотвращения насыщения при заселении высоко расположенных уровней ионов акцепторов.

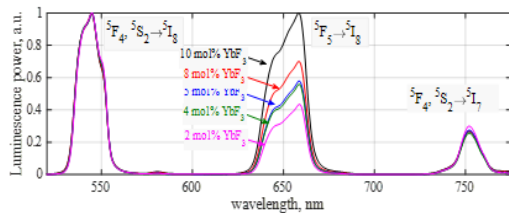


Рисунок 2 – Спектр АК люминесценции для образцов стекол с различным содержанием фторида иттербия

На рисунке 3 в качестве примера представлены некоторые результаты таких исследований.

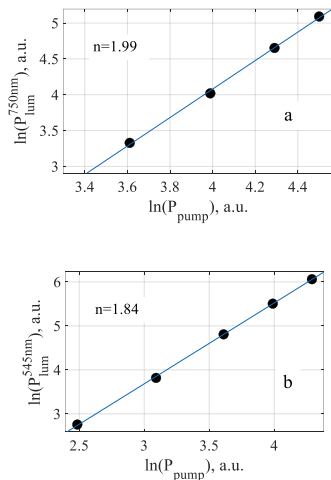


Рисунок 3 – Зависимости $\ln(P_{lum}) = n \ln(P_{pump}) + const$ для стекла Gl 1 (a) и Gl 2 (b)

В таблице 2 представлены значения параметра n для исследуемых стекол.

Таблица 2 – Значения параметра n для стекол с различной концентрацией ионов Yb^{3+}

	$N_{Yb}, 1/\text{cm}^3$	545 нм	660 нм	750 нм
Gl 1	$20,3 \cdot 10^{20}$	2,24	2,28	1,99
Gl 2	$17,0 \cdot 10^{20}$	1,84	1,80	1,79
Gl 3	$10,2 \cdot 10^{20}$	2,24	1,95	1,86
Gl 4	$8,20 \cdot 10^{20}$	2,23	2,20	2,23
Gl 5	$4,10 \cdot 10^{20}$	2,45	2,29	2,23

Как видно из результатов, представленных в этой таблице необходимо вовлечение двух фотонов возбуждающего излучения для заселения высокорасположенных уровней ионов гольмия, переходы с которых обуславливают АК люминесценцию.

Также были исследованы кинетики АК люминесценции на длинах волн 545 нм, 660 нм и 750 нм при возбуждении исследуемых стекол импульсами наносекундной длительности в линию поглощения ионов иттербия. На рисунке 4 представлены кинетики на этих длинах волн для образцов стекол Gl 1 и Gl 4. Как видно из представленных результатов, кинетики люминесценции на длинах волн 545 нм, 750 нм практически совпадают друг с другом и существенно отличаются от кинетики на 650 нм.

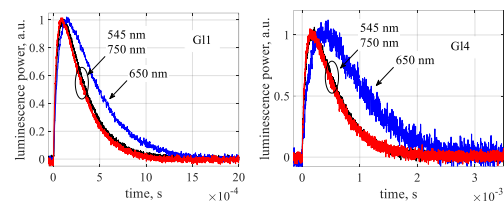


Рисунок 4 – Кинетики АК люминесценции для образцов стекол Gl 1 и Gl 4

Полученные результаты позволяют предложить схему переноса энергии возбуждения от ионов иттербия к ионам гольмия и каналы АК люминесценции, представленные на рисунке 5.

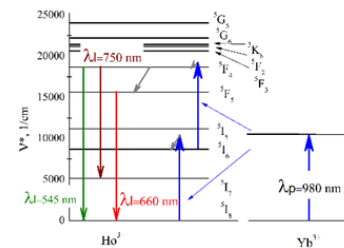


Рисунок 5 – Схема переноса энергии возбуждения от ионов Yb^{3+} к ионам Ho^{3+} и каналы АК люминесценции

На основе результатов, представленных на рисунке 2 изучаемые стекла могут быть охарактеризованы как источники света в видимой области спектра и представлены хроматическими координатами на цветовой диаграмме, см. рисунок 6.

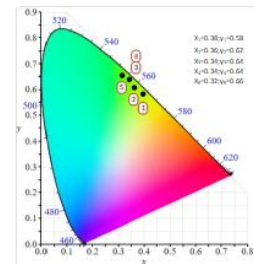


Рисунок 6 – Цветовая диаграмма CIE для стекол Gl 1 – Gl 5

Как видно из рисунка 6 при увеличении концентрации ионов иттербия цвет АК люминесценции смещается в желтую область спектра.

Таким образом, в данной работе установлена схема переноса энергии возбуждения от ионов

Yb^{3+} к ионам Ho^{3+} во фторфосфатных стеклах, активированных этими ионами, и установлена зависимость цвета АК люминесценции от концентрации ионов иттербия.

УДК 621.382.233

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ P-N-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GAAS

Лагунович Н. Л.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Разработана одномерная модель p-n-структуры на основе GaAs, с помощью которой выполнено приборное моделирование указанного светоизлучающего перехода и исследованы его электрофизические свойства. Моделирование выполнено с помощью разработанной автором программы MOD-1D, которая дала возможность рассчитать и построить зависимости интенсивности излучения рассматриваемой диодной структуры от координаты и определить, как положение максимума интенсивности его излучения $I_{\max}$ зависит от напряжения, прикладываемого к p-n-переходу. Установлено, что при низких уровнях инжекции смещение $I_{\max}$ по глубине GaAs-структур отсутствует; в условиях высоких уровней инжекции наблюдается смещение положения $I_{\max}$ в область с более высоким уровнем концентрации легирующей примеси.

Ключевые слова: p-n-переход, полупроводниковая светоизлучающая структура, приборное моделирование, прямое падение напряжения, интенсивность излучения.

THE SIMULATION OF LIGHT-EMITTING GAAS-BASED P-N STRUCTURES

Lagunovich N. L.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The one-dimensional model of structure with p-n-junction received on basis of GaAs was designed and the research of structure electrophysical parameters and its radiative characteristics were carried out by means of simulation. Such model are in the composition of program MOD-1D developed by the author also and the device modeling investigated diode structure was performed by means of this program. MOD-1D gives the possibility to calculate and construct dependence of such structure emission intensity on the coordinate and to receive the dependence of its radiation intensity maximum $I_{\max}$ position on the voltage applied to the p-n-junction.

Keywords: p-n-junction, semiconductor light-emitting structure, device simulation, forward voltage drop, radiation intensity.

*Адрес для переписки: Лагунович Н. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: natlag@bntu.by*

Введение. В настоящее время разработаны и широко применяются как в качестве дискретных приборов, так и в составе интегральных микросхем различного назначения различные типы структур с p-n-переходом [1] (диоды, светодиоды [2; 3], стабилитроны [4], биполярные транзисторы [1] и т. д.). Моделирование [5] полупроводниковых гомо- и гетероструктур занимает важное место при разработке и оптимизации новых изделий электронной техники, так как позволяет снизить количество натурных экспериментов. При работе светоизлучающих полупроводниковых приборов [2; 3] помимо основных параметров их вольт-амперных характеристик особый интерес представляют также их излучательные свойства. Целью данной работы было разработать одномерную модель GaAs полупроводниковой p-n-структуры, выполнить ее приборное моделирование и определить, как изменится положение максимума интенсивности ее излучения по глубине с ростом напряжения смещения, прикладываемого к p-n-переходу. Для осуществления приборного

моделирования указанного диода была использована созданная автором программа для одномерного проектирования MOD-1D [6], в основе которой заложены разработанные автором модели ряда полупроводниковых структур.

Модель светоизлучающей GaAs-диодной структуры. С целью получения электрофизических параметров и характеристик рассматриваемой GaAs-диодной структуры было выполнено ее приборное моделирование с помощью программы MOD-1D [6]. В ней применена модель, основу которой составила фундаментальная система уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении и в предположении справедливости статистики Больцмана.

В состав ФСУ в диффузионно-дрейфовом приближении входят уравнение Пуассона и два уравнения непрерывности для электронов и дырок. Предполагается, что основным механизмом рекомбинации в прямозонных полупроводниковых соединениях типа GaAs, легированных мелкими донорами и акцепторами, является излучательная

рекомбинация, которая осуществляется преимущественно за счет прямых излучательных переходов зона – зона и зона – мелкая примесь. Полное число излучательных переходов в единице объема при межзонной рекомбинации R пропорционально концентрациям свободных электронов и дырок:

$$R=B \cdot n \cdot p, \quad (1)$$

где B – коэффициент излучательной рекомбинации, n, p – концентрации электронов и дырок в полупроводнике, соответственно.

При построении использованной в данной работе численной модели предполагалось, что распределение интенсивности излучения определяется уравнением, которое может быть записано в виде

$$I(x) = C \cdot n(x) \cdot p(x), \quad (2)$$

где C – нормирующий коэффициент; $n(x), p(x)$ – распределения электронов и дырок по структуре, соответственно.

Результаты моделирования и их обсуждение. Распределения интенсивности излучения по глубине $I(x)$ исследуемой структуры были рассчитаны и построены с применением упомянутой выше программы MOD-1D. Результаты расчета $I(x)$ в относительных единицах приведены на рисунке 1, из которого видно, как меняется распределение интенсивности излучения светодиода с изменением, прикладываемого к структуре прямого напряжения смещения. Расчеты выполнялись для случая, когда общая длина исследуемой структуры в направлении моделирования x составляла 2 мкм, а глубина залегания р-п-перехода была равна 1 мкм.

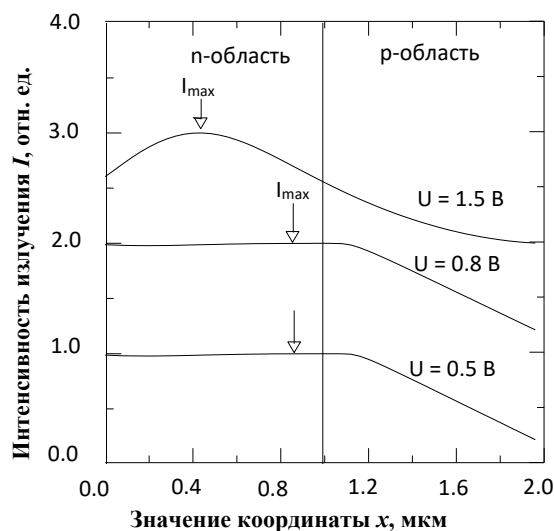


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности излучения светодиодных структур на основе GaAs от координаты x вдоль структуры, полученные с применением программы MOD-1D

На рисунке 1 приведены зависимости $I(x)$ при напряжениях U равных 0,5 В, 0,8 В и 1,5 В. Максимальное смещение $I_{\max}$ по глубине светодиода (0,38 мкм) наблюдалось при величине $U = 1,5$ В. Из рисунка 1 также видно, что разница в смещении положения $I_{\max}$, полученного при $U = 0,5$ В и $U = 0,8$ В, почти отсутствует и близка к нулю.

Таким образом, для светоизлучающих диодов на основе GaAs имеет место пространственное изменение положения области с максимумом светимости при изменении тока инжекции. Оказалось, что данный эффект зависит не только от уровней инжекции и свойств материала, но и от градиентов концентраций легирующей примеси, и от ее рекомбинационных свойств. Чем больше градиент концентраций легирующих примесей в n - и p -областях, тем на большую величину смещается максимум интенсивности излучения структуры от границы p - n -перехода.

Заключение. Применение разработанной автором одномерной модели, исследуемой в работе светодиодной структуры на основе GaAs с целью выполнения ее приборного моделирования с помощью программы MOD-1D (также разработанной автором) позволило снизить затраты машинного времени в 2–3 раза по сравнению с затратами необходимыми для случая двумерного моделирования. Были определены тенденции изменения положения $I_{\max}$ прибора для различных уровней инжекции и значений концентраций легирующих примесей в p - и n -областях. Установлено, что при низких уровнях инжекции смещение $I_{\max}$ по глубине структур отсутствует; в условиях высоких уровней инжекции наблюдается смещение положения $I_{\max}$ в область с более высоким уровнем концентрации легирующей примеси.

Литература

1. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
2. Коган, Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
3. Берг, А. Светодиоды / А. Берг, П. Дин. – М.: Мир, 1979. – 686 с.
4. Зайцев, Ю. В. Полупроводниковые стабилитроны / Ю. В. Зайцев. – М.: Энергия, 1969. – 41 с.
5. Королев, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 397 с.
6. Компьютерная программа MOD-1D: св. о рег. комп. прогр. 742 Респ. Беларусь / Н. Л. Лагунович; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – № т 20140041; зарег. 10.03.2015.

УДК 621.373.826

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ КВАЗИБЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ПУЧКОВ

Шакин О. В.^{1,4}, Казаков В. И.¹, Белый В. Н.², Ропот П. И.², Кулак Г. В.³¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург, Россия²Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь³Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь⁴Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены экспериментальные результаты исследования эффективности акустооптического сканирования традиционных гауссовых и квазибездифракционных бесселевых пучков. Установлена важная особенность при управлении параметрами квазибездифракционного (бесселева) пучка: уменьшение полосы сканирования не приводит к ухудшению числа разрешимых положений, поскольку для дефлектора бесселевых пучков это число определяется отношением интервала сканирования к диаметру сфокусированного пучка. С учетом малого диаметра сфокусированного бесселева пучка потенциально число разрешимых положений может превышать аналогичный параметр для гауссовых пучков, по крайней мере, на порядок. Проведен сравнительный анализ основных характеристик акустооптического управления пучками различного типа.

Ключевые слова: акустооптика, дифракция, дефлектор, бесселев пучок, управление, кристалл, парателлурит.

ACOUSTO-OPTIC SPATIAL SCANNING OF QUASI-DIFFRACTION-FREE BEAMS

Shakin O. V.^{1,4}, Kazakov V. I.¹, Bely V. N.², Ropot P. I.², Kulak G. V.³¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, Russia²Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus³Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Belarus⁴Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Experimental results of a study on the efficiency of acousto-optic scanning of traditional Gaussian and quasi-diffraction-free Bessel beams are presented. An important feature of controlling the parameters of a quasi-diffraction-free (Bessel) beam is established: reducing the scanning bandwidth does not lead to a deterioration in the number of resolvable positions, since for a Bessel beam deflector this number is determined by the ratio of the scanning interval to the diameter of the focused beam. Given the small diameter of the focused Bessel beam, the number of resolvable positions can potentially exceed the similar parameter for Gaussian beams by at least an order of magnitude. A comparative analysis of the main characteristics of acousto-optic control of beams of various types is carried out.

Keywords: acousto-optics, diffraction, deflector, Bessel beam, control, crystal, paratellurite.

Адрес для переписки: Казаков В. И., ул. Большая Морская, 67, г. Санкт-Петербург, 190000, Россия
e-mail: kvi@guap.ru

Введение. Наиболее известным классом квазибездифракционных полей являются бесселевы световые пучки [1–4]. Энергия в поперечном сечении бесселевого пучка нулевого порядка распределена в виде яркого центрального пятна, окруженного системой концентрических колец. При этом интенсивность в кольцевых зонах уменьшается с увеличением радиальной координаты. Важными отличительными чертами таких пучков, в сравнении с традиционными гауссовыми пучками, являются бездифракционность в заданной области пространства и способность самореконструкции волнового фронта за экраном [4]. Такие пучки имеют как фундаментальный, так и прикладной интерес.

Результаты экспериментальных исследований. Структурная схема комбинированной для исследования возможностей управления гауссовым и бесселевым световыми пучками с помощью разработанного в ГУАП экспериментального образца акустооптического дефлектора на

парателлурите был собран стенд, фотография которого показана на рисунке 1.

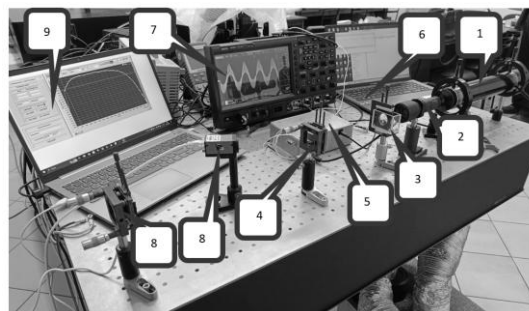


Рисунок 1 – Стенд для исследования управления гауссовым и бесселевым световыми пучками

В состав стенда вошли: 1 – лазер ЛГН-214 с центральной длиной волны 628 нм; 2 – расширитель пучка Thorlabs; 3 – аксикон; 4 – экспериментальный образец дефлектора для квазибездифракционных пучков на парателлурите; 5 – генератор

синтезатор частот с встроенным усилителем; 6 – персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением для управления генератором-синтезатором частот; 7 – настольный комбинированный цифровой осциллограф; 8 – ПЗС-камеры для регистрации акустооптического взаимодействия и измерения параметров профилей падающего и дифрагированных пучков; 9 – ПК с программным обеспечением для регистрации профилей падающего и дифрагированных пучков.

Эксперимент включал в себя регистрацию результата дифракции и акустооптического управления гауссовым и бesselевым световыми пучками. Наблюдаемый результат дифракции для гауссова и бesselевых пучков в дальней зоне приведен на рисунке 2.

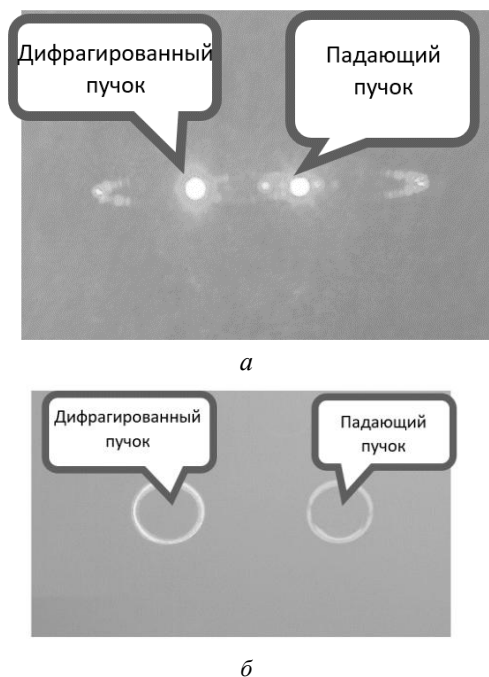


Рисунок 2 – Результат дифракции гауссова (а) и бesselевых (б) пучков

Далее были исследованы возможности акустооптического сканирования гауссова и бesselева световых пучков при изменении частоты управляющего радиосигнала. Изменение частоты управляющего колебания осуществлялось в диапазоне от 65 до 95 МГц с шагом 5 МГц. Мощность управляющего колебания составляла 2 Вт.

На рисунке 3 показаны результаты измерения и расчета эффективности дифракции для гауссова и бesselева светового пучков.

Для гауссова пучка сканирование с высокой эффективностью дифракции оказалось возможным во всем диапазоне сканирования 65...95 МГц.

Для бesselева пучка диапазон сканирования с высокой эффективностью дифракции составляет около 10 МГц (в диапазоне 70–80 МГц). Из рис. 3 следует, что интенсивность дифрагированного излучения для гауссова пучка составляет до 95 %, а для бesselева пучка – до 70 %.

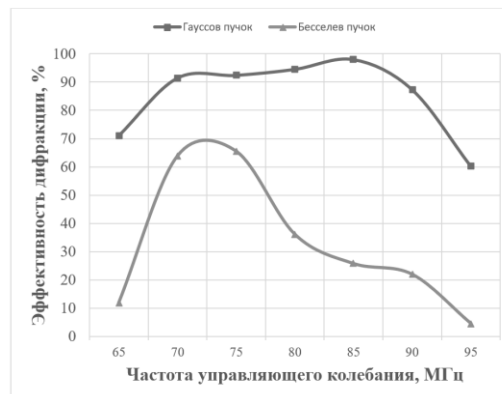


Рисунок 3 – Интенсивность падающего и дифрагированных гауссова и бesselева пучков

Выводы. Снижение эффективности дифракции бesselева пучка связано с тем, что излучение после аксикона (бesselев пучок) имеет конусность, что ограничивает возможности акустооптического управления по эффективности дифракции и угловому сканированию. Несмотря на конусность падающего на дефлектор бesselева пучка, показана возможность управления его положением в пространстве. Повышение эффективности дифракции и угла сканирования бesselева пучка возможно за счет модификации управления параметрами акустического пучка в дефлекторе, что планируется реализовать в ходе дальнейших исследований

Благодарности. Работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке программы Союзного государства «Компонент-Ф» (СЧ НИР Шифр «Бesselь РФ и РБ - ГУАП»).

Литература

1. Durnin, J. Exact solutions for nondiffracting beams / J. Durnin // Journal of the Optical Society of America A. – 1987. – № 4. – P. 651–654.
2. Bandres, M. A. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems / M. A. Bandres, J. C. Gutierrez-Vega // Optics Express. – 2007. – № 25. – P. 16727–16736.
3. Zhou, G. Propagation of Airy beams in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis / G. Zhou, R. Chen, X. Chu // Optics Express. – 2012. – № 3. – P. 2205–2214.
4. Herman, R. M. Production and uses of diffractionless beams / R. M. Herman, T. A. Wiggins // Journal of the Optical Society of America A. – 1991. – № 6. – P. 932–942.

СЕКЦИЯ 3. БИМЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 616-079:616.98:578.834

ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗАТОРА ACL TOP 750 В ВЫЯВЛЕНИИ МАРКЕРОВ ГИПЕРКОАГУЛЯЦИИ ПРИ COVID-19

Анисько Л. А.¹, Щербакова Е. Н.²

¹УЗ «Городская клиническая инфекционная больница» г. Минска

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Результаты исследования, основанного на данных коагулометра ACL TOP 750, демонстрируют, что значимое повышение D-димера и снижение антитромбина III при поступлении являются предикторами неблагоприятного исхода у пациентов с COVID-19. Это доказывает необходимость интеграции современных технологий гемостазиологии в клинические протоколы для своевременной коррекции терапии.

Ключевые слова: COVID-19, система гемостаза, коагулопатия, D-димер, антитромбин III, автоматический коагулометр, ACL TOP 350.

CAPABILITIES OF AUTOMATED LABORATORY DIAGNOSTICS: USING THE ACL TOP 750 ANALYZER TO DETECT HYPERCOAGULATION MARKERS IN COVID-19

Anisko L. A.¹, Shcherbakova E. N.²

¹City Clinical Infectious Diseases Hospital

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Results from a study utilizing the ACL TOP 750 coagulometer demonstrate that a significant increase in D-dimer and a decrease in antithrombin III upon hospital admission are predictors of an adverse outcome in patients with COVID-19. This proves the necessity of integrating modern hemostasis technologies into clinical protocols for timely therapy adjustment.

Keywords: COVID-19, hemostatic system, coagulopathy, D-dimer, antithrombin III, automatic coagulometer, ACL TOP 750.

Адрес для переписки: Щербакова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Патогенез тяжелых форм COVID-19 тесно связан с нарушениями в системе гемостаза, ведущими к тромботическим осложнениям. Своевременная и точная лабораторная диагностика этих изменений критически важна для стратификации риска и коррекции терапии. В данном контексте выбор высокоточного аналитического оборудования является ключевой задачей биомедицинской инженерии, обеспечивающей достоверность получаемых данных.

Ключевым звеном в развитии тяжелых форм COVID-19 выступает связывание вируса с рецепторами ангиотензинпревращающего фермента 2 (АПФ2), экспрессируемыми на мембранах эндотелиальных клеток, альвеолоцитов II типа и ряда других клеток-мишеней [1]. Данное взаимодействие инициирует каскад патологических процессов, результатом которых становятся дисфункция эндотелия, нерегулируемый выброс провоспалительных цитокинов (феномен «цитокинового шторма») и активация плазматического и тромбоцитарного компонентов системы свертывания крови [2].

Формирующаяся в результате специфическая коагулопатия, идентифицируемая как ассоциированная с COVID-19, обладает уникальными патогномичными признаками, отличающими ее от

классического ДВС-синдрома при сепсисе [3]. Ее отличительной особенностью является состояние выраженной гиперкоагуляции, лабораторно подтвержденное значительным ростом концентрации D-димера и фибриногена, при этом стандартные коагуляционные тесты (протромбиновое время, АЧТВ) демонстрируют лишь незначительное удлинение, а количество тромбоцитов на начальных этапах болезни остается в пределах нормы или даже повышается [4].

Цель работы: оценить значимость показателей системы гемостаза, полученных на автоматическом анализаторе ACL TOP 350, в качестве предикторов неблагоприятного исхода у пациентов с COVID-19.

Материалы и методы: В одноцентровом ретроспективном когортном исследовании приняли участие 9256 пациентов с подтвержденным COVID-19. Забор венозной крови производился при поступлении. Комплексная оценка параметров гемостаза, включая АЧТВ, протромбиновый индекс (ПТИ), тромбиновое время (ТВ), фибриноген, D-димер и антитромбин III, была выполнена на автоматическом коагулометрическом анализаторе ACL TOP 750 (Instrumentation Laboratory, США) с использованием реагентов HemosIL (рисунок 1).

Технические особенности оборудования:
Анализатор ACL TOP 350 является представителем класса высокопроизводительных лабораторных систем для гемостазиологии.

Метод детекции: Оптико-механическая (кинетическая) детекция сгустка.



Рисунок 1 – Внешний вид автоматического анализатора ACL TOP 750

Производительность: до 300 тестов в час.

Функционал: Выполнение широкого спектра рутинных и специализированных тестов коагуляции, включая хромогенные методы (например, для антифibrина III).

Использование данного анализатора обеспечивает высокую воспроизводимость, точность и стандартизацию измерений, что минимизирует преаналитические погрешности и является фундаментом для получения статистически значимых результатов в крупных когортах.

Результаты: Сравнение групп неблагоприятных ($n = 375$) и благоприятных ($n = 8881$) исходов выявило статистически значимые различия (U-критерий Манна-Уитни, $p < 0,0001$) по ключевым параметрам, измеренным на ACL TOP 350 (рисунок 2):

D-димер: Медиана 464,5 нг/мл (благоприятный исход) против 198,0 нг/мл (неблагоприятный исход).

Антифibrин III: Медиана 81,0 % (неблагоприятный исход) против 99,0% (благоприятный исход).

Фибриноген: Медиана 5,62 г/л ((неблагоприятный исход) против 5,03 г/л (выжившие).

Протромбиновый индекс: Медиана 83,0 % (неблагоприятный исход) против 93,0 % (благоприятный исход).

Тромбиновое время: Медиана 15,4 с ((неблагоприятный исход) против 14,9 с (благоприятный исход).

Показатель АЧТВ значительно не отличался между группами ($p = 0,95$).

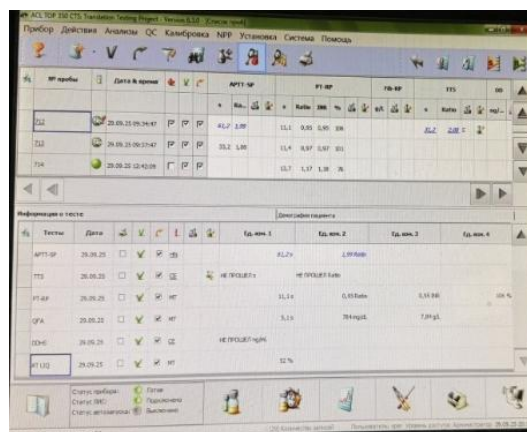


Рисунок 2 – Пример визуализации результатов исследования гемостаза в программном обеспечении анализатора

Выводы:

1. Применение автоматического анализатора ACL TOP 750 позволило с высокой точностью идентифицировать комплекс нарушений гемостаза у пациентов с неблагоприятным исходом COVID-19, характеризующийся гиперкоагуляцией и коагулопатией потребления.

2. Наиболее значимыми прогностическими маркерами, определенными с помощью данной системы, являются D-димер и антифibrин III.

3. Результаты подтверждают, что интегрированные в современное медицинское оборудование технологии (такие как реализованные в ACL TOP 350) являются критически важным инструментом в биомедицинской инженерии для решения задач прогнозирования, мониторинга и персонализации терапии при системных патологиях, включая COVID-19.

Литература

1. SARS-CoV-2 cell entry depends on ACE2 and TMPRSS2 and is blocked by a clinically proven protease inhibitor / M. Hoffmann [et al.] // Cell. – 2020. – Vol. 181, № 2. – P. 271–280.
2. Levi, M. Coronavirus disease 2019 coagulopathy: disseminated intravascular coagulation and thrombotic microangiopathy – either, neither, or both / M. Levi, J. Thachil // Seminars in Thrombosis and Hemostasis. – 2020. – Vol. 46, № 7. – P. 781–784.
3. Coagulopathy of coronavirus disease 2019 / T. Iba [et al.] // Critical Care Medicine. – 2020. – Vol. 48, № 9. – P. 1358–1364.
4. ISTH interim guidance on recognition and management of coagulopathy in COVID-19 / J. Thachil [et al.] // Journal of Thrombosis and Haemostasis. – 2020. – Vol. 18, № 5. – P. 1023–1026.

УДК 621.79.02

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ И ПЕСКОСТРУЙНОЙ
ОБРАБОТКИ НА УДАЛЕНИЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ
С ПОВЕРХНОСТИ НИТИНОЛОВЫХ СТЕНТОВ**

Анциц А. А.¹, Бодяк Д. А.¹, Минченя В. Т.², Савченко А. Л.²

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Нитиноловые стенты, производимые методом лазерной резки, часто имеют оксидную пленку на поверхности, которая может препятствовать дальнейшим процессам модификации. В настоящей работе исследовано влияние химического травления и пескоструйной обработки на удаление этой оксидной пленки при различных режимах. Образцы обрабатывались при различных режимах обработки, а влияние обработки оценивалось визуально с использованием микроскопа. Результаты демонстрируют, что эти методы эффективно удаляют оксидный слой и подготавливают поверхность нитинолового стента к ее последующей обработке.

Ключевые слова: нитинол, оксидная пленка, стент, химическое травление, пескоструйная обработка.

**THE INFLUENCE OF CHEMICAL ETCHING AND SANDBLASTING
ON THE REMOVAL OF THE OXIDE FILM FROM
THE SURFACE OF NITINOL STENTS**

Anshyts A. A.¹, Bodyak D. A.¹, Minchenya V. T.², Savchenko A. L.²

¹State enterprise "Science and technology park of BNTU «Polytechnic»"

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Nitinol stents manufactured by laser cutting often have an oxide film on the surface, which can hinder further modification processes. In the present study, the influence of chemical etching and sandblasting on the removal of this oxide film under various regimes was investigated. Samples were processed under different treatment regimes, and the effect of the treatment was evaluated visually using a microscope. The results demonstrate that these methods effectively remove the oxide layer and prepare the surface of the nitinol stent for its subsequent processing.

Keywords: nitinol, oxide film, stent, chemical etching, sandblasting.

Адрес для переписки: Анциц А. А., Сурганова 47/1, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anshyts.a.a@gmail.com

Нитинол (NiTi-сплав) является предпочтительным материалом для производства сосудистых стентов благодаря суперэластичности и эффекту памяти формы, позволяющим саморазворачивание имплантата. Однако процесс лазерной резки, используемый для формирования стентов, приводит к образованию оксидной пленки (преимущественно TiO₂ и NiO), а также к появлению заусенцев и термически измененного слоя, что может вызывать воспаления, тромбоз и снижать биосовместимость [1]. Удаление этой оксидной пленки критически важно, поскольку она препятствует эффективной электрохимической полировке – процессу, который сглаживает поверхность и улучшает интеграцию стента в сосудистую ткань.

Химическое травление позволяет селективно растворять оксидные слои и удалять загрязнения [2], в то время как пескоструйная обработка [3] механически удаляет оксиды, заусенцы и термически поврежденный материал. Цель исследования – оценить эффективность этих методов в удалении оксидной пленки после лазерной резки и их влияние на морфологию поверхности для оптимизации подготовки к электрохимической полировке

Материалы и методы

Использовались нитиноловые стенты, полученные методом лазерной резки, с диаметром 10 мм и длиной 60 мм. Оксидная пленка образовалась в результате термического воздействия лазера. Для травления применялся раствор HF + HNO₃ + H₂O. Пескоструйная обработка проводилась абразивом Al₂O₃ при различных давлениях.

Образцы были разделены на группы для оценки влияния обработки:

Группа 1: Химическое травление в растворе HF + HNO₃ + H₂O в течение 1 минуты (режим А) – для селективного удаления оксидов.

Группа 2: Химическое травление в растворе HF + HNO₃ + H₂O в течение 2 минут (режим В) – для более глубокого растворения слоя.

Группа 3: Химическое травление в растворе HF + HNO₃ + H₂O в течение 3 минут (режим С) – для интенсивного удаления оксидов.

Группа 4: Пескоструйная обработка при давлении 2 бара в течение 6 минут (режим D) – механическое удаление оксидов и заусенцев.

Группа 5: Пескоструйная обработка при давлении 3 бара в течение 6 минут (режим E) – умеренное абразивное воздействие.

Группа 6: Пескоструйная обработка при давлении 4 бара в течении 6 минут (режим F) – усиленное удаление.



Рисунок 1 – Оптическое изображение после травления в режиме А. Оксидная пленка частично удалена, видны микропоры

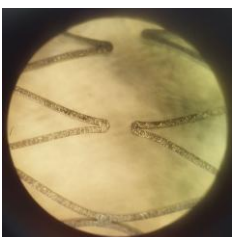


Рисунок 2 – Оптическое изображение после травления в режиме В. Более полное удаление оксидов с эрозией

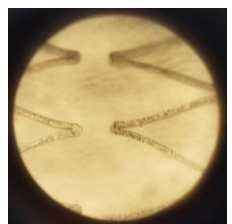


Рисунок 3 – Оптическое изображение после травления в режиме С. Интенсивное удаление оксидов с глубокими порами

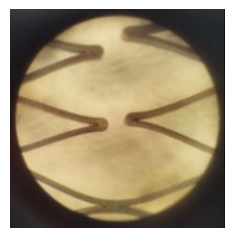


Рисунок 4 – Оптическое изображение после пескоструй в режиме D. Механическое удаление оксидов с микрорамками



Рисунок 5 – Оптическое изображение после пескоструй в режиме Е. Умеренное удаление с повышенной шероховатостью

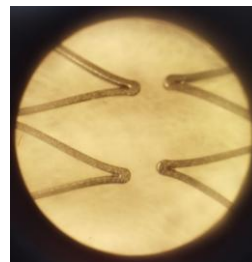


Рисунок 6 – Оптическое изображение после пескоструй в режиме F. Усиленное удаление с дефектами

После обработки образцы промывались дистиллированной водой в ультразвуковой ванне. Для оценки влияния обработки использовался визуальный осмотр через оптический микроскоп. Оценка удаления оксидов основывалась на визуальном анализе поверхности.

Результаты. Фотографии, полученные через оптический микроскоп, подтвердили эффективное удаление оксидной пленки в зависимости от режима, подготавливая поверхность к электрохимической полировке.

Обсуждение. Химическое травление в растворе $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ эффективно растворяет оксидную пленку от лазерной резки, удаляя TiO_2 и NiO , что предотвращает коррозию и готовит к электрохимической полировке для финальной гладкости. Увеличение времени травления (от 1 до 3 минут) усиливает удаление, но может привести к чрезмерной эрозии. Пескоструйная обработка механически снимает оксиды и заусенцы, повышая площадь поверхности для лучшей адгезии, но при давлениях выше 3 бара вводит дефекты. Результаты визуального осмотра через оптический микроскоп подтверждают, что оптимальные режимы (травление 1–2 минуты и пескоструй 2–3 бара) обеспечивают сбалансированное удаление оксидов, минимизируя риски и подготавливая к полировке.

Заключение. Химическое травление и пескоструйная обработка эффективно удаляют оксидную пленку от лазерной резки нитиноловых стентов, контролируя морфологию и подготавливая поверхность к электрохимической полировке. Оптимальные режимы (травление 1–2 минуты и пескоструй 2–3 бара) балансируют удаление оксидов и сохранение свойств.

Литература

1. Dong, J. Surface engineering and the application of laser-based processes to stents - A review of the latest development / J. Dong, M. Pacella, Y. Liu, L. Zhao // *Bioactive Materials*. – 2021. – Vol. 10. – P. 159–184.
2. Chemical etching of nitinol stents / B. Katona, E. Bognár, B. Berta [et al.] // *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. – 2013. – Vol. 15. – P. 3–8.
3. Shabalovskaya, S. Critical overview of Nitinol surfaces and their modifications for medical applications / S. Shabalovskaya, J. Anderegg, J. Van Humbeeck // *Acta Biomaterialia*. – 2008. – Vol. 4. – P. 447–467.

УДК 338.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА РАЗРАБОТКИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Журкевич М. В., Калинин А. Ю.

Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
Минск, Беларусь

Аннотация. В статье обозначены проблемные вопросы, а также возможные пути их решения, касающиеся оценки целесообразности разработки и организации производства новых медицинских изделий. Рассмотрен подход к оценке эффективности разработки и организации производства медицинских изделий на основе расчета социально-экономического эффекта.

Ключевые слова: медицинские изделия, оценка экономической эффективности, социально-экономический эффект, инновационная деятельность.

DETERMINING THE SOCIO-ECONOMIC EFFECT OF THE DEVELOPMENT AND ORGANIZATION OF PRODUCTION OF MEDICAL DEVICES

Zhurkevich M. V., Kalinin A. U.

State Enterprise “Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»”, Minsk, Belarus

Abstract. This article identifies problematic issues and possible solutions related to assessing the feasibility of developing and manufacturing new medical devices. An approach to assessing the effectiveness of developing and manufacturing medical devices based on calculating the socio-economic impact is considered.

Keywords: medical devices, effectiveness assessment, socio-economic impact, innovation activities.

Адрес для переписки: Калинин А. Ю., ул. Сурганова, 37/1 г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: kalinin@park.bntu.by

Медицинские изделия являются социально значимой продукцией, производством и применением которой оказывает непосредственное воздействие на социальную защищенность населения.

Ключевым вопросом при принятии решения о начале разработки медицинских изделий и организации их последующего производства является определение целесообразности данных действий. В настоящий момент основные подходы к решению данного вопроса основаны на оценке экономической эффективности. При этом оценка экономической эффективности осуществляется либо для производителя медицинских изделий, либо для медицинских учреждений, в деятельности которых данные изделия будут применяться.

Оценка экономической эффективности для производителя включает следующие основные показатели: объем производства, выручка от реализации продукции, прибыль. На основе данных показателей определяется окупаемость инвестиций. Оценка экономической эффективности для медицинских учреждений, как правило, включает показатели, отражающие сокращение затрат на оказание медицинской помощи.

Указанные показатели не учитывают социально-экономический эффект от внедрения новых медицинских изделий для национальной экономики в целом. Существующий подход ограничивает возможности кооперации и консолидации разработчиком (производителем) медицинских изделий и медицинских учреждений, непосредственно использующих данные медицинские изделия при оказании медицинской помощи (медицинских услуг). Так, например, в Республике Беларусь в настоящий момент отсутствуют интегрированные структуры (в первую очередь,

кластеры), объединяющие указанные выше организации, деятельность которых фактически формирует полный научно-инновационный цикл медицинских изделий.

В настоящий момент расчет финансово-экономических показателей в рамках инвестиционных и инновационных проектов должен быть произведен согласно Правилам по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов, утвержденных Постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 31 августа 2005 г. № 158 [1]. При этом в рамках расчета показателей эффективности проекта для более детального отображения сущности проекта может быть рассчитан социально-экономический эффект, достигаемый при реализации проекта. Расчет социально-экономического эффекта может быть осуществлен с учетом концептуальных подходов Методик расчетов эффективности медицинских технологий в здравоохранении, утвержденных Министерством здравоохранения Республики Беларусь 31 декабря 2003 г. (рег. № 159-1203) [2].

Для расчета социально-экономического эффекта могут быть использованы следующие показатели:

- сокращение потерь валового внутреннего продукта (далее – ВВП) вследствие снижения уровня утраты трудоспособности за счет использования новых медицинских изделий;

- сокращение потерь налогов и сборов в связи со снижением уровня нетрудоспособности за счет использования новых медицинских изделий.

Расчет социально-экономического эффекта может быть осуществлен с учетом следующих предпосылок:

1. Граждане Республики Беларусь, которым оказывается медицинская помощь с использованием изделий медицинского назначения, разрабатываемых по проекту, в дальнейшем возвращаются к труду.

2. За счет использования медицинских изделий происходит снижение уровня смертности и нетрудоспособности (инвалидности) и, как следствие, снижается объем расходов за счет средств республиканского бюджета на выплату пособий по нетрудоспособности (инвалидности).

3. Часть предотвращенных в результате использования медицинских изделий потерь ВВП, представляет собой продукцию, которая предназначена для реализации на внешних рынках.

Расчет социально-экономического эффекта может предполагать следующие допущения и ограничения:

1. Необходимо точное определение медицинских изделий, применение которых оказывает непосредственное воздействие на обеспечение достижения показателей социально-экономического эффекта.

2. Необходимо определение доли пациентов трудоспособного возраста и доли пациентов трудоспособного возраста, которые не утрачивают трудоспособность по результатам оказания медицинской помощи с использованием соответствующих медицинских изделий.

3. Если в рамках проекта предусматривается расширение номенклатуры и/или объема производства медицинских изделий, то социально-экономический эффект целесообразно определять как эффект, достигаемый за счет соответствующего расширения номенклатуры и/или объема производства.

4. Должен быть определен средний объем пособия (пенсии) по нетрудоспособности (инвалидности). При этом необходимо установить будет ли объем пособия (пенсии) по нетрудоспособности (инвалидности) неизменным или будет корректироваться в течение расчетного периода производства медицинских изделий.

5. Должна быть определена номинальная начисленная среднемесячная заработная плата работников по стране. При этом необходимо установить будет ли номинальная начисленная среднемесячная заработная плата работников по стране корректироваться или останется неизменной в течение расчетного периода.

6. Должен быть определен средний объем производства (ВВП) на одного человека. При этом необходимо установить будет ли средний объем производства (ВВП) на одного человека

неизменным или будет корректироваться в течение расчетного периода.

7. Должна быть определена доля экспорта в сокращаемых потерях ВВП. При этом необходимо установить будет ли доля экспорта в сокращаемых потерях ВВП неизменной в течении расчетного периода производства соответствующих медицинских изделий.

Сокращение потерь ВВП вследствие снижения уровня утраты трудоспособности за счет использования медицинских изделий при оказании медицинской помощи может быть учтено при расчете притока наличности в рамках расчета чистого потока наличности и показателей эффективности инвестиционного или инновационного проекта. При этом доля экспорта в сокращаемых потерях ВВП за счет применения медицинских изделий может быть учтена в рамках расчета сальдо потока денежных средств по экспортно-импортным операциям при расчете потока средств по экспортно-импортным операциям в рамках проекта.

Сокращение потерь налогов и сборов в связи со снижением уровня нетрудоспособности за счет использования медицинских изделий при оказании медицинской помощи может быть учтено при расчете сальдо денежного потока в рамках расчета окупаемости государственной поддержки.

Таким образом, определение социально-экономического эффекта должно являться неотъемлемой составляющей при определении экономической эффективности разработки медицинских изделий. Кроме того, определение социально-экономического эффекта является крайне актуальным при разработке принципиально новых видов медицинских изделий, что может сопровождаться созданием интегрированных инновационно-производственных комплексов (структур) [3].

Литература

1. Об утверждении Правил по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов: постановление М-ва экономики Респ. Беларусь от 31 авг. 2005 г. № 158: в ред. от 10 мая 2018 г. № 15 // Пех: информ. правовая система (дата обращения: 28.11.2024).

2. Методики расчетов эффективности медицинских технологий в здравоохранении // Современные методы диагностики, лечения и профилактики заболеваний. – URL: <http://med.by/methods/book.php?book=500/> (дата обращения: 24.09.2025).

3. Калинин, А. Ю. Интегрированные инновационные структуры в мировой и национальной экономике / А. Ю. Калинин; науч. ред. Ю. И. Енин. – Мн.: Право и экономика, 2024. – 190 с.

УДК 543.06+536.252

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ИТО-СТРУКТУРАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПАХ**Ильин Е. А.¹, Белов Д. А.²**¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения²Институт аналитического приборостроения РАН
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В тексте описано численное моделирование системы для обеспечения тепловых режимов микрофлюидного чипа с нагревательным элементом на основе ИТО. Приведены результаты статического и динамического анализа систем при различных условиях нагрева и тепловых мощностях.

Ключевые слова: микрофлюидика, тепловое моделирование, полидиметилсилоксан, оксид индия-олова, ПЦР-РВ.

MODELING OF A SYSTEM WITH ITO-STRUCTURES FOR PROVIDING THERMAL CONDITIONS IN MICROFLUIDIC CHIP**Ilin E. A.¹, Belov D. A.²**¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation²Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences
St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper describes a numerical simulation of a thermal control system for a microfluidic chip with a heating element based on an ITO coating. The results of static and dynamic analysis of the systems are presented under various heating conditions and thermal capacities.

Keywords: microfluidics, thermal modeling, PDMS, ITO, qPCR.

Адрес для переписки: Белов Д. А., а/я 140, Санкт-Петербург, 198095, Россия
e-mail: belov.da@list.ru

Применение микрофлюидных технологий позволяет управлять потоками жидкости в микро-структурах и контролируемо воздействовать на них, в том числе, обеспечивая необходимые температуры жидкостей. Известные технические решения позволяют обеспечить скорости изменения температуры в пределах от 0,1 до 2000 °С/с, термостатирование в пределах от –3 °С до 120 °С и градиенты температур по поверхности чипа от 6 до 40 °С/мм [1].

Широкое применение в задачах обеспечения тепловых режимов при реализации анализа методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) в микрофлюидных чипах могут получить тонкопленочные покрытия на основе оксида индия-олова (ИТО) вследствие их высокой оптической прозрачности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (около 85 % в диапазоне 400–700 нм) и относительно высокой электропроводности [2].

Нанесение покрытий ИТО на стеклянные подложки позволяет создавать микрофлюидные чипы с интегрированными нагревателями и микро-структурами различных топологий, формируемыми в органических полимерах, таких как полидиметилсилоксан (PDMS) [3].

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования таких чипов с целью оценки эффективности нагрева с помощью ИТО-покрытий.

Материалы и методы. Предложенный микрофлюидный чип (рисунок 1) состоит из стеклянной пластины (i) размером 50 × 50 мм с нанесенным покрытием ИТО и присо-

единенными металлическими электродами (ii) с одной стороны, и полимеризованного слоя PDMS (iii) со сформированными рядами реакционных камер (iv), заполняемыми жидкими пробами, с другой стороны.

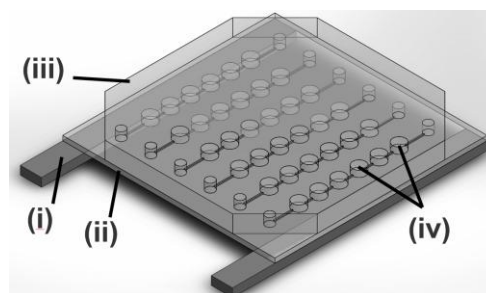


Рисунок 1 – Распределение температур по элементам сборки модели во времени, при нагреве одной пластиной

Электроды были исключены из модели по причине их несущественного влияния на тепловые процессы.

Численное моделирование реализовывалось в программном пакете SolidWorks. Использовались следующие характеристики материалов:

– PDMS: модуль упругости – 0,33 Н/мм²; коэффициент Пуассона – 0,495; массовая плотность – 965 кг/м³; теплопроводность – 0,2 Вт/м·К; удельная теплоемкость – 370 Дж/кг·К;

– стекло: модуль упругости – 69 кН/мм²; коэффициент Пуассона – 0,23; массовая плотность – 2457,6 кг/м³; теплопроводность – 0,75 Вт/м·К; удельная теплоемкость – 834,61 Дж/кг·К.

Результаты моделирования. В таблице 1 приведены результаты численного моделирования в стационарном режиме при различных значениях тепловой мощности ИТО-нагревателя.

С увеличением тепловой мощности увеличивается различие в максимальной и минимальной температурах воды, находящейся в реакционных камерах.

На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования в динамическом режиме при нагреве с мощностью 6 и 10 Вт.

Таблица 1 – Температуры в реакционных камерах при различных значениях тепловой мощности

Средние значения температур в реакционных камерах, °C	Тепловая мощность, Вт						
	2	4	6	8	10	14	18
Максимальное	84	149	214	279	343	550	701
Минимальное	80	140	200	260	320	517	659

Жидкость (вода) в реакционных камерах нагревается до 95 °C при мощности 6 Вт за 180 секунд, при 10 Вт – менее, чем за 100 секунд.

Закключение. Показано, что при мощности нагрева в 10 Вт нагрев жидкости в камерах до 95 °C выполняется за время около 90 секунд. Выявлено, что с увеличением тепловой мощности и времени нагрева возрастает различие температур жидкости в различных реакционных камерах микрофлюидного чипа – растет неравномерность температурного поля.

Выполнен выбор конфигурации микрофлюидного чипа по критерию максимума скорости нагрева и минимума неравномерности температурного поля.

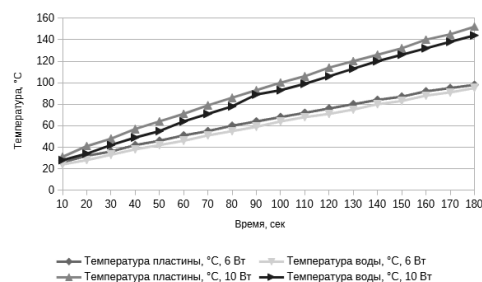


Рисунок 2 – Изменение средних температур воды в реакционной камере и греющей стеклянной пластины

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00761-22-00 Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Review of Heating and Temperature Control in Microfluidic Systems: Techniques and Applications / V. Miralles [et al.] // *Diagnostics*. – 2013. – № 1. – P. 33–67.
2. Electrical, optical, and structural properties of indium tin oxide thin films for organic light-emitting devices / H. Kim [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Vol. 86, № 11. – P. 6451–6461.
3. Alghannam, F. Recent Progress in PDMS-Based Microfluidics Toward Integrated Organ-on-a-Chip Biosensors and Personalized Medicine / F. Alghannam [et al.] // *Biosensors*. – 2025. – Vol. 15, № 2. – P. 76.

УДК 621.8.024.6

3-D ПРОТЕЗИРОВАНИЕ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Левоненко Ю. И.¹, Лукьянов А. В.¹, Кудина А. В.¹, Габец В. Л.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Исследовано применения 3D-печати для протезирования верхних и нижних конечностей. Проанализированы методы и материалы, обеспечивающие создание протезов.

Ключевые слова: 3D-печать, протез, 3D-протезирование.

3D PROSTHETICS FOR THE UPPER AND LOWER EXTREMITIES

Levonenko Y. I.¹, Lukyanov A. V.¹, Kudina A. V.¹, Gabets V. L.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The application of 3D printing for prosthetics of upper and lower limbs is investigated. The methods and materials enabling the creation of prostheses are analyzed.

Keywords: 3D printing, prosthesis, 3D prosthetics.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: a.kudina@bsuir.by

Ампутация верхних и нижних конечностей представляет собой сложную медико- социальную проблему, приводящую к стойкой утрате функций, нарушению социальной адаптации и снижению качества жизни пациента. Традиционные методы

изготовления протезов, основанные на субтрактивном производстве и ручном формировании, характеризуются высокой себестоимостью, длительностью производственного цикла, меньшей массой готовых изделий и часто их

ограниченной функциональностью. Актуальность применения 3D-печати в протезировании конечностей обусловлена возможностью создания высокоперсонализированных и функциональных изделий. Использование данной технологии позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционных методов, такие как высокая стоимость, длительное изготовление и неидеальное соответствие анатомическим особенностям пациента.

Современное 3D-протезирование конечностей начинается с создания высокоточной цифровой модели культи пациента методом 3D сканирования или путем реконструкции по компьютерной томографии. После идет процесс компьютерного проектирования протеза с точным учетом индивидуальных анатомических особенностей человека, послойная печать компонентов и постобработка [1].

Выбор технологии и материалов также играет ключевую роль. Для производства чаще всего применяют метод послойного наплавления (МПН), который основан на термической экструзии и послойном осаждении расплавленного термопластичного полимерного материала в соответствии с цифровой моделью объекта. Визуализация технологического процесса метода послойного наплавления представлена на рисунке 1.

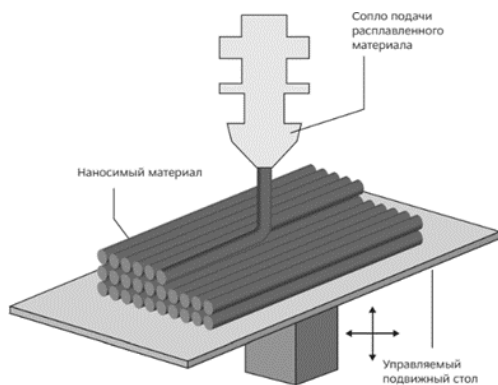


Рисунок 1 – Визуализация процесса МПН

Метод послойного наплавления демонстрирует оптимальное соотношение функциональности, доступности и универсальности, что обуславливает его доминирование в сфере 3D-протезирования. Ключевыми преимуществами этого метода являются: экономическая эффективность ввиду низкой стоимости оборудования и расходных материалов, оперативность производства, доступность и децентрализация.

В методе послойного наплавления используются такие материалы как: стандартные термопласты (PLA, ABS), инженерные термопласты (PETG, нейлон, TPU) и композитные материалы (PLA/ABS + углеволокно) [2].

Для создания более прочных и сложных конструкций применяется селективное лазерное спекание (СЛС). Технология СЛС позволяет работать не только с полимерными порошками, но и с металлическими сплавами, в частности титановым сплавом, чей модуль упругости близок

к костной ткани, что обеспечивает биомеханическую совместимость, равномерное распределение нагрузки и профилактику атрофии. Схематическое представление процесса селективного лазерного спекания представлено на рисунке 2.

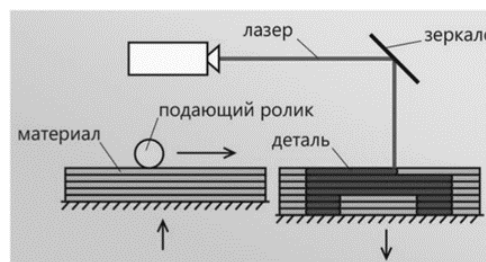


Рисунок 2 – Схематичное представление процесса СЛС

В технологии селективного лазерного спекания используются такие материалы как: полимерные порошки (нейлон PA11, нейлон PA12), высокопрочные полимеры (ПEEK, PEKK), металлические порошки (Ti6Al4V, CoCr, AlSi10Mg) [2].

3D-печать позволяет создавать широкий спектр решений – от косметических протезов до сложных функциональных систем. Биомеханика верхних конечностей предъявляет высокие требования к протезам в отношении легкости, функциональности и эстетики.

В протезировании выделяют 3 основных вида протезов: пассивные протезы, активные (механические) протезы и биоэлектрические (миоэлектрические) протезы.

Пассивные протезы выполняют исключительно эстетическую и компенсаторную (например, опорную) функции. 3D-печать позволяет с высокой точностью воспроизвести утерянную конечность, включая анатомический рельеф и даже отпечатки пальцев.

Активные (механические) протезы приводятся в движение остаточной мускулатурой пациента через систему тросов. Аддитивные технологии позволяют оптимизировать геометрию кинематических элементов (шарниров, креплений) для снижения трения и повышения эффективности передачи усилий [3].

Биоэлектрические (миоэлектрические) протезы наиболее технологически сложный класс. 3D-печать применяется для создания индивидуальной приемной гильзы, идеально повторяющей рельеф культи, что критически важно для стабильного контакта электродов с кожей и точного считывания биопотенциалов мышц. Корпус протеза и элементы крепления также могут быть напечатаны, снижая общий вес устройства.

Использование 3D-печати в создании данных видов протезов дает высокую точность и повторяемость, а также позволяет минимизировать итоговый вес изделия.

Для протезирования нижних конечностей ключевыми являются требования к прочности,

долговечности и способности выдерживать циклические нагрузки.

Приемные гильзы – это наиболее успешное применение 3D-печати в данной области. Индивидуально спроектированные и напечатанные гильзы обеспечивают оптимальное распределение давления, что предотвращает развитие потер-тостей, мацераций кожи и других осложнений. 3D-печать позволяет создавать сложные геометрические структуры (решетчатые или сотовые заполнения), которые обеспечивают требуемую жесткость и прочность при значительном снижении массы протеза по сравнению со сплошными конструкциями из традиционных материалов.

Хотя основные силовые компоненты (пиромиды, коленные модули, стопы) все еще производятся классическими методами из углеводородного волокна и титана, ведутся активные исследования по 3D-печати из металлических сплавов (сплавы титана, алюминия) для создания нестандартных или экспериментальных дизайнов.

Несмотря на впечатляющие преимущества аддитивных технологий, а именно 3D протезирование верхних и нижних конечностей, их повсеместное внедрение в клиническую практику протезирования сдерживается рядом существенных технологических и регуляторных вызовов.

Ключевой проблемой остается то, что прочностные характеристики и усталостная выносливость большинства 3D-печатных полимеров (таких как PLA, ABS, нейлон) объективно уступают свойствам традиционных композитных материалов, используемых в протезировании, например, углеводородному волокну или высокопрочным смолам. Это связано с анизотропией и наличием микродефектов структуры, возникающих на границах между слоями во время 3D-печати. В результате, для высоконагруженных протезов нижних конечностей или активных тяговых протезов рук долговременная надежность напечатанных компонентов все еще вызывает вопросы и требует дальнейших исследований в области материаловедения, включая разработку армированных композитных филаментов.

Литература

1. Вересовский, С. А. Применение 3D-печати в протезировании конечностей / С. А. Вересовский // Вестник науки и образования. – 2018. – № 2. – С. 25–28.
2. Голуб, И. В. Использование 3D-принтинга в протезировании / И. В. Голуб, А. В. Лебедев // Биомедицинская инженерия и электроника. – 2017. – № 4. – С. 6.
3. Бионический протез кисти руки: пат. 176303 РФ, МПК А61F 2/54 / С. А. Муравьев; опубл. 16.01.2018.

УДК: 615.47:616-072.7

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ЛЕГОЧНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ ОСНОВАННЫЙ НА СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Магруппов Т. М.¹, Ахмаджонов Р. Р.¹, Носиров М. У.¹, Раджабов А. Г.²

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты исследования методологических и алгоритмических основ обработки и анализа биомедицинских изображений легочных заболеваний. Разработаны методы, алгоритмы обучения и архитектура сверточных нейронных сетей для классификации изображений легких. Сформирована база биомедицинских изображений легочных заболеваний с последующей их обработкой. Предложен способ оцифровки изображений и клинических данных, чтобы получить данные для моделей в форме, удобной и готовой для анализа. Предложенные алгоритмы основаны на сверточных нейронных сетях, и обеспечивают автоматически извлекать и анализировать ключевые признаки на изображениях.

Ключевые слова: модель нейронной сети, обработка и анализ изображений, классификация заболеваний легких, обучение и оценка модели.

PROCESSING AND ANALYSIS OF BIOMEDICAL IMAGES IN PULMONARY DISEASES BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Magrupov T. M.¹, Ahmadjonov R. R.¹, Nosirov M. U.¹, Radjabov A. G.²

¹Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

²United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article investigates the methodological and algorithmic foundations of processing and analyzing biomedical images of pulmonary diseases. Methods, training algorithms, and architecture of convolutional neural networks for classifying lung images are developed. A database of biomedical images of pulmonary diseases is formed with their subsequent processing. A method for digitizing images and clinical data is proposed to obtain data for models in a form convenient and ready for analysis. The proposed algorithms provide automatic extraction and analysis of key features in images.

Keywords: neural network model, image processing and analysis, lung disease classification, model training and evaluation.

Адрес для переписки: Магруппов Т. М., Университетская улица 2, г. Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: talatmi@rambler.ru

В последнее годы заболевания легких занимают одно из ведущих мест в статистике потерь трудоспособности во всех странах мира. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), легочные или респираторные заболевания по-прежнему являются одной из самых распространенных причин смерти во всем мире [1–3]. По оценкам ВОЗ, более 3 миллионов человек ежегодно умирают от различных легочных заболеваний.

Легочные заболевания могут вызывать различные проблемы для здоровья человека, их раннее выявление, диагностика и лечение очень важны. Поэтому методы выявления заболеваний легких по изображениям должны быть реализованы с использованием высокоточных моделей [4–8]. Нейронные сети и особенно технологии глубокого обучения открывают новые возможности для диагностики и прогнозирования легочных заболеваний на основе обработки и анализа биомедицинских изображений легких.

Целью исследования является разработка модели сверточных нейронных сетей для анализа, обработки и классификации биомедицинских изображений легких для определения типа заболеваний.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи исследования: формирование базы данных, предварительная обработка изображений, перевод данных в цифровой вид, проектирование архитектуры модели сверточной нейронной сети для классификации, обучение модели, оценка модели.

Материалы и методы. Исследована структура нейронной сети для классификации заболеваний легких на основе сверточных нейронных сетей (CNN). Определены архитектурные слои, их роли, а также процесс обучения и оценки модели. Поэтапно показано, как модель обнаруживает заболевания легких. Эффективное их решение позволили улучшить качество данных и сохранить высокий уровень точности модели.

На рисунке 1 представлены алгоритм процесса квалификации биомедицинских изображений легких и предложена последовательность решения задач.

Формирование базы данных. Процесс сбора данных имеет решающее значение для успешной классификации изображений легких с помощью искусственного интеллекта. В работе проводится обучение модели нейронных сетей на основе изображений, полученных с помощью мультиспиральной компьютерной томографии (MSKT) в формате DICOM, для выявления заболеваний легких.

При этом основное внимание уделено на: анонимность и конфиденциальность данных; преобразованию формата DICOM в другие форматы; интеграции с метаданными; устранению искажения данных; переобозначению и балансировке; размеру и структуре данных; способам расширения базы данных.



Рисунок 1 – Алгоритм процесса квалификации биомедицинских изображений легких

Предварительная обработка изображений обеспечивает максимальную эффективность процесса обучения модели. Собранные изображения MSKT были обработаны, прежде чем их можно будет использовать непосредственно для моделей.

Перевод данных в цифровой вид. После предварительной обработки изображений следующим шагом будет их преобразование в цифровые представления. Основная цель – обеспечить преобразование данных в читаемый и обрабатываемый вид для цифрового представления модели: преобразование изображений в цифровой массив; преобразование данных в тензорное представление; нормализация данных; цифровизация клинических данных в цифровой формат; организация набора данных; хранение и загрузка данных.

Проектирование архитектуры модели сверточной нейронной сети для классификации особенно эффективна для классификации изображений, поскольку она может изучать сложные характеристики изображений и делать на их основе точные выводы благодаря своей многоуровневой структуре.

Базовая структура CNN состоит из нескольких слоев, каждый слой выполняет определенную функцию: ввод, свертка, объединение в пул, сглаживание, полное соединение, вывод. Основным компонентом CNN является сверточный слой, который выполняет свертки по изображению, выделяя важные признаки, такие как края, текстуры и узоры, которые могут быть связаны с патологией.

Обучение модели. Для выявления типа заболеваний легких произведено обучение модели на основе изображений, полученных с помощью MSKT. При этом данные разделены на обучающую и тестовую выборки с помощью `train_test_split`, а обучение модели осуществлено данными обучения.

Оценка модели. После обучения модели оценена ее эффективность по тестовым данным. На этом этапе модель демонстрирует свою способность правильно классифицировать заболевания легких на основе данных испытаний. При этом модель проверен на реальных данных в клинических и практических испытаниях.

Заключение. Проанализированы изображения легких, полученные с помощью мультиспиральной компьютерной томографии при фиброзе.

и пневмонии. Разработана архитектура сверточных нейронных сетей для анализа, обработки и классификации легочных заболеваний. Предложены алгоритмы проектирования, обучения и оценки модели CNN для обнаружения заболеваний легких с использованием библиотек Keras и TensorFlow.

Литература

1. Levitan, R. The Importance of Lung Sound Analysis in Medical Diagnosis / R. Levitan, J. Stephen // *Journal of Pulmonary Medicine*. – 2020. – № 5. – P. 345–357.
2. Wang, Y. Deep Learning Applications in Medical Diagnosis: A Comprehensive Review / Y. Wang, X. Chen // *International Journal of Medical Informatics*. – 2019. – Vol. 112. – P. 66–77.
3. Lee, K. S. Neural Networks for Automated Respiratory Sound Analysis / K. S. Lee // *Biom. Signal Processing and Control*. – 2019. – Vol. 51. – P. 79–85.

4. Singh, P. Challenges in Respiratory Sound Data Collection for Disease Classification / P. Singh, A. Kumar // *Respiratory Medicine and Research*. – 2021. – № 2. – P. 103–110.

5. Ghorbani, M. Assessment of Acoustic Features in Respiratory Sound Analysis / M. Ghorbani, H. M. Amir // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2020. – Vol. 67, № 9. – P. 2895–2903.

6. He, Q.-H. An improved lung sound de-noising method by wavelet packet transform with PSO-based threshold selection / Q.-H. He [et al.] // *Intelligent Automation & Soft Computing*. – 2018. – Vol. 24, № 2. – P. 223–230.

7. Magrupov, T. M. Formation of a database of lung disease sound signals / T. M. Magrupov, R. M. Nazirov, I. N. Abdullaev // *Science and Innovation. International Scientific Journal*. – 2024. – Vol. 3, № 9. – P. 90–95.

8. Магруппов, Т. М. Алгоритмическая и программная реализация технологии классификации биомедицинских изображений легочных / Т. М. Магруппов [и др.] // *Медицинская техника*. – 2025. – № 2. – С. 18–22.

УДК 681

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРИМПЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ МАРКЕРОВ ВО ВНУТРИСОСУДИСТЫЕ ИМПЛАНТАТЫ

Розов Д. В.¹, Бодяк Д. А.¹, Минченя В. Т.¹, Савченко А. Л.²

¹РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрена автоматизированная система для установки рентгеноконтрастных маркеров в каркасы внутрисосудистых имплантатов, устраняющая недостатки ручного метода и снижающая риск брака. Система включает модуль точного позиционирования, кинематический модуль с тензорезистивным контролем усилия (0–200 Н, дискретность 1 Н) и управляющий контроллер с автоматическим и ручным режимами. Конструкция обеспечивает универсальность, надежную фиксацию имплантатов и безопасность оператора. Программное обеспечение позволяет адаптировать процесс под различные типы маркеров, повышая качество, эффективность и надежность производства медицинских изделий.

Ключевые слова: внутрисосудистые имплантаты, рентгеноконтрастные маркеры, автоматизация, нитиновые стенты, кримпирование.

AUTOMATED SYSTEM FOR CRIMPING RADIOCONTRAST MARKERS INTO INTRAVASCULAR IMPLANTS

Rozov D. V.¹, Bodyak D. A.¹, Minchenya V. T.¹, Savchenko A. L.²

¹State enterprise “Science and technology park of BNTU «Polytechnic»”

Belarussian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. This article discusses an automated system for installing radiopaque markers into intravascular implant frames, eliminating the drawbacks of the manual method and reducing the risk of defects. The system includes a precision positioning module, a kinematic module with strain gauge force control (0–200 N, 1 N resolution), and a controller with automatic and manual modes. The design ensures versatility, secure implant fixation, and operator safety. The software allows for process adaptation to various marker types, improving the quality, efficiency, and reliability of medical device production.

Keywords: intravascular implants, radiopaque markers, automation, nitinol stents, crimping.

Адрес для переписки: Розов Д. В., ул. Сурганова, 37/1, к. 208, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: rozovdima.2004@mail.ru

Введение. Одной из основных проблем, возникающих при производстве внутрисосудистых имплантатов, является установка в каркасы нитиновых стентов рентгеноконтрастных маркеров. При ручном способе отсутствуют методы контроля качества запрессовки маркеров, ввиду чего

возрастает вероятность брака. При недостаточном усилии маркеры будут иметь недостаточную деформацию, вследствие чего могут выпасть из каркаса стента в процессе эксплуатации. В случае избыточного усилия возникает вероятность нанести ущерб имплантату, что приведет его к негодности. Для решения данной проблемы была

разработана автоматизированная система, способная обеспечить высокое качество изделий медицинского назначения, а также увеличить эффективность производства.

Описание системы. Автоматизированная система состоит из трех модулей:

1. Модуль точного позиционирования. Позволяет размещать и фиксировать имплантаты в системе с высокой точностью, что способствует более качественной установке в них маркеров. Сменные элементы оснастки (адаптеры, стержни, зажимы) обеспечивают возможность работы с имплантатами различных видов с широким диапазоном типоразмеров.

2. Модуль кинематики и усилия. Зубчатое редукторное привода конвертирует вращательное движение шагового электродвигателя в линейный ход пресса до 40 мм без люфта. Присутствует система обратной связи по усилию на тензорезистивном датчике, которая позволяет поддерживать усилие пресса в диапазоне от 0 до 200 Н с дискретностью 1 Н, что позволит исключить как выпадание маркеров, так и повреждение каркаса имплантата.

3. Система управления и интерфейс. Встроенный контроллер обеспечивает как автоматический режим работы с полным циклом кримпирования, так и ручной с пошаговым управлением положением пресса, созданный для опытно-экспериментальной настройки параметров технологического процесса для маркеров различных видов и материалов.

Конструкция системы. Медицинские стенты надеваются на стержни соответствующих диаметров, после чего фиксируются двумя зажимами, что обеспечивает универсальность, надежное крепление и высокую скорость установки/снятия стентов. Давит на маркеры металлическая призма, закрепленная на одном конце тензорезистивного датчика, второй конец которого консольно закреплен на подвижной платформе. Данная платформа передвигается линейно по четырем направляющим за счет линейных подшипников и приводится в движение за счет шагового электродвигателя постоянного тока и зубчатое редукторной передачи. Для безопасности оператора, а также большей надежности и устойчивости конструкции рабочая зона системы ограничена металлической крышкой и корпусом из АБС-пластика и представлена на рисунке 1.

Система управления. Система управления строится на базе микроконтроллера ATmega328, задачами которого являются:

- управление шаговым электродвигателем;
- получение и обработка информации с тензорезистивного датчика;
- получение и обработка информации с элементов управления (энкодер, кнопки, концевой выключатель);
- отображение информации для оператора на дисплее и управление сигнальным светодиодом.

Вся аппаратная часть помещена в эргономичный корпус из АБС-пластика, представленный на рисунке 2.

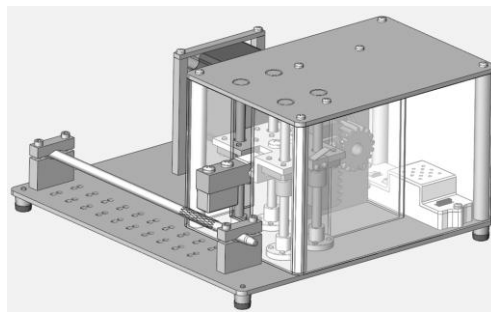


Рисунок 1 – Рабочая зона системы



Рисунок 2 – Блок управления системой

Разработанное программное обеспечение позволяет оператору использовать систему в двух режимах: автоматическом и ручном. Автоматический режим позволяет автоматизировать процесс кримпирования маркеров, ввиду чего повышаются его скорость и эффективность. В данном режиме роль оператора заключается в том, чтобы поместить в систему стержень с надетым на него имплантом, вложить в отверстия стента рентгеноконтрастные маркеры, настроить необходимые параметры для материала и размера маркера и запустить процесс.

Ручной режим реализован в основном для проведения экспериментов для более точной настройки системы под различные типы и материалы рентгеноконтрастных маркеров. В ручном режиме положением пресса можно управлять путем поворота ручки энкодера. Для получения экспериментальных данных и более точной подстройки системы под каждый вид маркеров на протяжении всего процесса на дисплее отображаются усилие с тензорезистивного датчика в реальном времени, а также максимальное зафиксированное им усилие.

Интерфейс системы управления позволяет оператору контролировать усилие с тензорезистивного датчика, управлять положением пресса в ручном режиме и задавать параметры для автоматического режима (требуемое усилие и скорость процесса). Меню оператора представлено на рисунке 3.

Mode 1
Speed: 5
Force: 155.0 N
Real Force: 27.3 N
Mode 2
Move <Active>
Max Force: 185.6 N
Real Force: 98.4 N

Рисунок 3 – Меню управления автоматическим режимом (сверху) и ручным режимом (снизу)

Процесс кримпирования. Оператор надевает имплантат на стержень соответствующего диа-

метра, после чего фиксирует полученную конструкцию зажимами в системе. Далее стент позиционируется и в его отверстие вкладывается рентгеноконтрастный маркер. После этого оператор выбирает режим работы системы и настраивает необходимые параметры. По завершении процесса стент поворачивается на 120° и позиционируется на стержне, а процесс повторяется для следующего маркера.

УДК 616-77; 616.13-089

ГРАДИЕНТНЫЕ ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Маркин Д. Н.¹, Минченя В. Т.¹, Глазов И. Е.², Савченко А. Л.³

¹Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

²Государственное научное учреждение «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлен анализ эволюции коронарных стентов – от голо-металлических конструкций до современных моделей с лекарственным покрытием; приведена классификация используемых полимерных матриц и комбинаций биосовместимых материалов. Целью исследования являлся подбор состава для градиентного покрытия на коронарных стентах с учетом доступности компонентов, обеспечивающих контролируемое и равномерное высвобождение фармакологически активного вещества при сохранении механической целостности конструкции.

Ключевые слова: стент коронарный, лекарственное покрытие на основе сиролимуса, полимерная матрица, градиентное распределение, контролируемое высвобождение.

GRADIENT MEDICINE COATINGS FOR CORONARY STENTS: EXPERIENCE AND PROSPECTS

Markin D. N.¹, Minchenya V. T.¹, Glazov I. E.², Savchenko A. L.³,

¹State enterprise "Science and technology park of BNTU «Polytechnic»"

²Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Science of Belarus

³Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents an analysis of the evolution of coronary stents – from bare-metal structures to modern drug-eluting models – and classifies the polymer matrices and combinations of biocompatible materials used. The aim of the study was to select a gradient coating composition for coronary stents, taking into account the availability of components that ensure controlled and uniform release of the pharmacologically active substance while maintaining the mechanical integrity of the structure.

Keywords: coronary stent, sirolimus-based drug coating, polymer matrix, gradient distribution, controlled release.

Адрес для переписки: Маркин Д. Н., Сурганова 47/1, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Dmitry.markin@park.bntu.by

Сердечно-сосудистые заболевания становятся все более тяжелым бременем для систем здравоохранения. Применение технологии стентирования значительно снизило риск острого тромбоза и улучшило качество жизни пациентов с ишемической болезнью сердца, однако рестеноз долгое время оставался ключевой проблемой, вызывающей осложнения после имплантации стента, что привело к развитию технологий покрытия стентов, обеспечивающих высвобождение лекарственных веществ и снижение частоты осложнений [1].

Первые коронарные стенты представляли собой конструкции из «голового» металла (Bare-Metal Stents, BMS), обеспечивающие механическую поддержку сосуда. Однако, реакция организма на

«голый» металл часто вызывает рестеноз – повторное сужение просвета артерии, за счет активации макрофагов и гиперплазию интимы [2], что обусловило необходимость модулирования реакции организма на имплантированный стент.

Для решения этих проблем разработаны стенты с нанесенным лекарственным покрытием (Drug-Eluting Stents, DES). В качестве действующего вещества в DES используют иммуномодуляторы, подавляющие преждевременное образование неоинтимы, что минимизирует риск рестеноза после имплантации стента [5]. Первое поколение DES (табл. 1) включает лекарственное покрытие на основе синтетических полимеров, таких как поли-н-бутилметакрилат (ПБМА) и полистирол-блок-

изобутилен-блок-стирол (СИБС). Данные полимеры выступают в качестве гидрофобной матрицы, обеспечивающей контролируемое высвобождение действующего вещества. Недостатки DES первого поколения обусловлены реакцией организма на синтетические полимеры без должной химической устойчивости и включают замедленную эндотелизацию, развитие хронических воспалительных реакций и повышенный риск тромбоза после имплантации стента [4].

Таблица 1 – Наиболее распространенные марки DES

Таблица 1. Наиболее распространенные марки DES		
Марка DES	Полимерная матрица	Действующее вещество
Первое поколение		Биолимус, Сиролимус, Эверолимус, Зотаролимус, Новолимус
Taxus, Firebird	СИБС	
DESyne Nx	ПБМА	
Cypher	Парилен С, ПБМА	
Второе поколение		
Promus, XIENCE	ПБМА, ПВДФ-ХФП	
Третье поколение		
Nobori, Biomatrix Flex, Synergy, Orsiro, Firehawk, Ultimaster, MiStent	полилактид либо его сополимеры с капролактоном, гликолидом	

Второе поколение DES создано с использованием биосовместимых и химических стойкость полимеров, таких как поливинилиденфторид-согексафторпропилен (ПВДФ-ХФП). К числу DES второго поколения относятся стенты марок *Xience* и *Promus*, ставшие «золотым стандартом» интервенционной кардиологии.

Альтернативой биосовместимым покрытиям являются покрытия на основе биоразлагаемых полимеров, составляющие DES третьего поколения. Такие материалы при взаимодействии с физиологической средой организма претерпевают постепенную биодеградацию с высвобождением действующего вещества и нетоксичных продуктов и снижением нагрузки на сосудистую стенку после завершения терапевтического эффекта [2].

Интерес у исследователей вызывают бесполимерные стенты, в которых действующее вещество удерживается за счет микропор или наноструктур на поверхности металлического каркаса. Однако такие системы сопряжены с проблемами контроля кинетики высвобождения и техническими сложностями производства.

Новейшим этапом в эволюции DES стали технологии селективного нанесения покрытия, включая градиентные и аблюминальные покрытия, в которых толщина и распределение полимера варьируются вдоль поверхности стента. Зоны с наибольшей механической нагрузкой оставляют без покрытия, что снижает риск его растрескивания или отслаивания. В то же время действующее вещество концентрируется в областях, где оно наиболее эффективно препятствует пролиферации клеток.

Практика применения DES показывает, что подбор и нанесение подходящей полимерной

матрицы является важнейшим этапом разработки DES, напрямую влияющим на клинические результаты его применения.

В настоящее время на базе организации ведется разработка технологии нанесения градиентного покрытия на коронарных стентах. В рамках проведенной работы и с учетом доступности компонентов лекарственного покрытия целесообразным является получение покрытий на основе биосовместимых полимеров ПБМА и ПВДФ-ХФП. Покрытия на основе ПВДФ-ХФП проявляют высокую степень биосовместимости за счет устойчивости к гидролитическому, окислительному и ферментативному разрушению, а их гидрофобная природа обеспечивает совместимость с действующим веществом [5]. В то же время, гидрофобные макромолекулы ПВДФ-ХФП характеризуются низкой адгезией к гидрофильной поверхности сплава в основе стента, что обуславливает необходимость формирования адгезионного слоя (праймера) между поверхностью стента и лекарственным покрытием, например, на основе ПБМА, характеризующегося биосовместимостью и хорошей адгезией к поверхности металлов.

Перспективным классом действующих веществ в составе DES являются сиролимус и его производные [6]. Производное сиролимуса, эверолимус, проявляет повышенную иммуномодулирующую активность и обеспечивает пониженный риск рестеноза по сравнению с сиролимусом. Эверолимус не уступает в эффективности структурным аналогам – зотаролимусу и биолимусу, но является одним из наиболее доступных в своем ряду, за счет чего используется в лекарственных покрытиях на стентах XIENCE и Promus – «золотых стандартов» интервенционной кардиологии.

Показано, что сочетание методов рамановской спектроскопии и спектрофотометрии позволяет идентифицировать природу компонентов лекарственного биосовместимого покрытия и оценить параметров высвобождения действующего вещества в модельной среде.

Дальнейшее развитие способов получения градиентных покрытий открывает новые возможности для повышения эффективности и безопасности применения коронарных стентов, сочетающих управляемое высвобождение препарата с минимизацией постимплантационных осложнений.

Литература

1. Coatings for Cardiovascular Stents—An Up-to-Date Review / A. S. Udriste [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25. – Art. 1078.
2. Hassan, S. Evolutionary perspective of drug eluting stents: from thick polymer to polymer free approach / S. Hassan, M. N. Ali, B. Ghafoor // Journal of Cardiothoracic Surgery. – 2022. – Vol. 17. – Art. 65.
3. Strohbach, A. Polymers for Cardiovascular Stent Coatings / A. Strohbach, R. Busch // International Journal of Polymer Science. – 2015. – Vol. 2015. – Art. 782653.

4. Development of Biodegradable Polymeric Stents for the Treatment of Cardiovascular Diseases / Y. Shen [et al.] // Biomolecules. – 2022. – Vol. 12. – Art. 1245.

5. Rizas, K. D. Stent polymers: do they make a difference? / K. D. Rizas, J. Mehili // Circulation: Cardiovascular Interventions. – 2016. – Vol. 9, № 6. – Art. e002943.

6. Venkatraman, S. Release profiles in drug-eluting stents: issues and uncertainties / S. Venkatraman, F. Boey // Journal of Controlled Release. – 2007. – № 3. – P. 149–160.

УДК 616.77

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ Рутковская В. М.¹, Доронь А. Е.¹, Кудина А. В.¹, Габец В. Л.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Компьютерная томография (КТ) основана на применении рентгеновского излучения для получения послойных изображений организма. С позиции биофизики этот метод позволяет изучать физические свойства биологических тканей: их плотность, атомный состав, динамику процессов. Сегодня внедряются инновационные технологии – спектральная КТ, фотон-считающие детекторы, итеративные алгоритмы реконструкции и 4D-томография. Эти решения обеспечивают более точное отображение структуры живых тканей при снижении дозы облучения.

Ключевые слова: компьютерная томография, биофизика, рентгеновское излучение, фотон-считающие детекторы, спектральная КТ.

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR CT DIAGNOSTICS Rutkovskaya V. M.¹, Doron A. E.^{1,2}, Kudina A. V.¹, Gabets V. L.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Computed tomography (CT) is based on the use of X-rays to obtain layered images of the body. From the perspective of biophysics, this method allows us to study the physical properties of biological tissues: their density, atomic composition, and process dynamics. Innovative technologies such as spectral CT, photon-counting detectors, iterative reconstruction algorithms and 4D tomography are being introduced today. These solutions provide a more accurate representation of the structure of living tissues while reducing the radiation dose.

Keywords: computed tomography, biophysics, X-ray radiation, photon-counting detectors, spectral CT.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. Петруся Бровки 10, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.kudina@bsuir.by

Введение. Биофизика рассматривает организм человека как сложную систему, в которой фундаментальные законы физики проявляются на разных уровнях организации материи – от молекул и клеток до органов и систем. Методы медицинской визуализации позволяют «заглянуть внутрь» живого организма без хирургического вмешательства. Среди них компьютерная томография (КТ) занимает особое место: она основана на регистрации ослабления рентгеновских квантов при прохождении через ткани организма. С развитием технологий КТ постепенно превращается из простого диагностического инструмента в высокоточный метод исследования физических свойств тканей. Как отмечает профессор С. К. Терновой: «Сегодня это не просто метод визуализации, а мощный диагностический инструмент, позволяющий получать детальную информацию о структуре и функции органов и тканей» [1].

Инновации в биофизической КТ.

1. Итеративные алгоритмы реконструкции.

Традиционно для восстановления изображения

применялись аналитические методы (например, фильтрованная обратная проекция). Однако они не учитывают сложные физические эффекты, такие как рассеяние или неоднородное поглощение. Итеративные алгоритмы работают по принципу приближения: создается первичная модель изображения, которая многократно уточняется с учетом физики взаимодействия рентгеновских квантов с веществом. Физической основой является фотоэффект (поглощение квантов электронами атомов) и эффект Комптона (неупругое рассеяние). Итеративные алгоритмы реконструкции позволяют уменьшить шум, улучшить качество изображения мягких тканей и снизить дозу облучения пациента. Например, при КТ сердца становится возможным получать изображения коронарных артерий с меньшей лучевой нагрузкой, что важно для динамических исследований кровотока.

2. Спектральная (двухэнергетическая) томография. Обычная КТ использует рентгеновские кванты одной энергии, а спектральная – два разных энергетических диапазона. Физическая

основа: разные ткани по-разному поглощают кванты в зависимости от их энергии (закон Бугера–Ламберта). Например, в биофизике кровообращения спектральная КТ помогает отличать кальцинированные бляшки от жировых, что дает представление о механических свойствах сосудистой стенки и риске ее разрыва.

3. Фотон-считающие детекторы. Вместо регистрации суммарного сигнала (как в обычной КТ), эти системы фиксируют каждый отдельный фотон и измеряют его энергию. Данные детекторы прямо преобразовывают рентгеновские кванты в электрический сигнал с высокой точностью. Компьютерная томография, как метод визуализации, претерпела значительные изменения благодаря внедрению спектрального анализа и фотон-считающих детекторов, что позволило перейти от качественной оценки к количественному анализу структуры тканей [2]. В биофизике применяется в изучении распределения микроэлементов (Ca, Fe, Zn) в тканях; количественном анализе плотности минерализации костей; исследовании обменных процессов в живых системах. Например, диагностика остеопороза становится более точной, поскольку можно не только измерить плотность кости, но и оценить распределение минералов на микроуровне.

4. 4D-КТ (четырёхмерная компьютерная томография) – это современный метод визуализации, который дополняет традиционную трёхмерную КТ временным параметром, позволяя наблюдать движение и функционирование органов в реальном времени. В отличие от статичных изображений, получаемых при обычной КТ, 4D-КТ фиксирует серию снимков с высокой частотой кадров, синхронизированных с дыхательным циклом или сердечным ритмом пациента. Это дает возможность изучать динамику живых систем, таких как легкие, сердце и кровеносные сосуды, в процессе их работы. Физическая суть метода заключается в последовательной регистрации изображений, что позволяет создавать видеомодель органа в действии. Особенно ценна 4D-КТ при исследовании биомеханики легких: она позволяет измерять их эластичность, податливость и оценивать динамику газообмена. Это важно для диагностики и понимания физических свойств дыхательной системы, особенно при заболеваниях, таких как хроническая обструктивная болезнь легких, фиброз или онкология. Метод также применяется при функциональных нагрузках – например, для

отслеживания движения опухолей при дыхании, что критически важно при планировании лучевой терапии. Кроме того, он позволяет оценивать изменения положения органов при смене позы или физической активности, что полезно в хирургии и реабилитации. Преимущества 4D-КТ включают высокую точность визуализации движущихся структур, возможность персонализированного подхода к лечению и расширенные возможности функциональной диагностики. Эта технология активно используется в онкологии, пульмонологии, кардиологии и других областях медицины, где важно не только видеть анатомию, но и понимать, как она работает.

5. Новые источники излучения. Прорывом последних лет стало применение новых источников рентгеновских квантов. Микрофокусные трубки: обеспечивают точечный пучок с диаметром менее 10 мкм, что позволяет получать изображения с ультравысоким разрешением [2]. Современные инновации в компьютерной томографии демонстрируют тесную интеграцию физических и биологических наук. Использование итеративных алгоритмов, спектрального анализа, фотон-считающих технологий, динамической визуализации и новых источников излучения позволяет исследовать живые ткани с беспрецедентной точностью.

Заключение. Таким образом, КТ не только продолжает эволюционировать как основной метод визуализации в клинической практике, но и служит важным инструментом для расширения наших знаний о функционировании организма на молекулярном и клеточном уровнях. Инновации в области итеративных методов реконструкции, спектральной томографии, динамической визуализации и интеграции с искусственным интеллектом обещают новые возможности для диагностики и персонализированного подхода к лечению.

Литература

1. Загреддинова, Н. П. Основы применения технологии компьютерной томографии / Н. П. Загреддинова, З. И. Хайруллина // Вестник науки. – 2022. – Т. 3, № 5(50). – С. 188–192.
2. Агеев, Б. Современная компьютерная томография: технологии, возможности и перспективы. Интервью с проф. С. К. Терновым и проф. Е. А. Мершиной / Б. Агеев // Радиология-практика. – 2022. – URL: <https://radiology-practice.ru/> (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 796.92.093.642

УСТАНОВКА ДЛЯ СТРЕЛКОВОЙ ПОДГОТОВКИ БИАТЛОНИСТОВ Савченко А. Л., Смольский А. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе приведены результаты разработки опытной конструкции установки для тренировки устойчивости спортсмена-биатлониста на позиции для стрельбы. Установка позволяет имитировать как ветровые, так и другие помехи для стрельбы и тренировать изготовку и устойчивость системы стрелок-оружие.
Ключевые слова: биатлон, стрельба, тренировка, технические средства, устройство.

A DEVICE FOR SHOOTING TRAINING OF BIATHLONISTS

Savchenko A. L., Smolsky A. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents the results of developing a pilot setup for training biathletes' stability in a shooting position. The setup simulates wind and other shooting obstacles and trains the position and stability of the shooter-gun system.

Keywords: biathlon, shooting, training, technical means, device.

Адрес для переписки: Петров П. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Стрелковая подготовка в биатлоне имеет свои особенности по сравнению с обычной спортивной стрельбой: стрельба после интенсивного бега на лыжах при высоком артериальном давлении, высокой частоте сердечных сокращений и напряженном психоэмоциональном возбуждении. Поэтому подготовка биатлонистов ближе не к подготовке спортивных стрелков, а к подготовке работников силовых структур.

В обоих случаях в тренировочном процессе интенсивно используются технические средства. В первую очередь это тренажеры для отработки стрельбы:

- лазерные тренажеры. На дульный срез винтовки крепится лазерный модуль, который активируется в момент спуска курка. Лазерный луч попадает на мишень со специальными датчиками;
- пневматические и CO₂ винтовки. Используются стандартные биатлонные винтовки, переоборудованные под стрельбу свинцовыми пулями с помощью сжатого воздуха или CO₂;
- тренажеры для отработки изготовления и устойчивости. Спортсмен встает в изготовку, а тренер с помощью лазерного целеуказателя, закрепленного на стволе, наблюдает на мишени за малейшими колебаниями мушки.

Кроме того, используют системы видеоанализа и биометрические датчики. К ним относят высокоскоростные видеокамеры, датчики на винтовке (IMU-датчики), пульсометры.

Также востребованы симуляторы гоночных условий: беговые дорожки с мишенями, средства виртуальной реальности.

Как дополнительное оборудование используют электронные мишени и станции пристрелки с оптикой.

Цель работы – разработка устройства для имитации помех при стрельбе, приводящих к нарушению положения спортсмена: ветер, учащенный пульс, нарушение координации движений из-за усталости.

Элементами новизны является использование качающейся платформы с управляемыми электроприводами в подготовке биатлонистов.

Обычно в подготовке стрелков используют качающиеся платформы как со свободным качанием, так и с приводами. Примерный внешний вид показан на рисунке 1.

Стрелок при выполнении специальных упражнений корректирует осанку, тренирует мышечный тонус, улучшает координацию.



Рисунок 1 – Качающаяся платформа

Тренажер позволяет:

- отрабатывать приемы стрельбы в неустойчивом положении,
- отрабатывать приемы прицеливания из такого положения,
- приспосабливаться к условиям, препятствующим прицеливанию и стрельбе из неустойчивого положения.

Разработанное устройство имеет более широкие возможности по имитации неустойчивого положения. За основу взято устройство для тренировки стрельбы в силовых структурах [1], в котором платформа перемещается тремя электроприводами (рисунок 2, а).

В предлагаемой конструкции платформа имеет размер стандартного биатлонного коврика для стрельбы 2000 × 1540, что позволяет тренироваться в стрельбе из положения как стоя, так и лежа (рисунок 2, б).

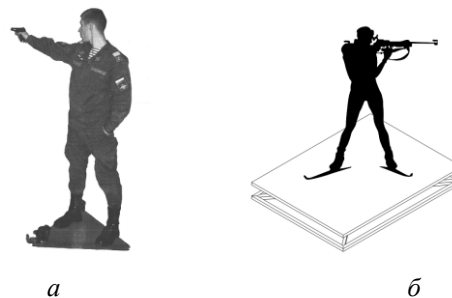


Рисунок 2 – Стрелок на подвижной платформе (а) и схема установки (б)

Платформа для размещения стрелка выполнена из фанеры с покрытием из пенополиуретана. Платформа по углам с помощью уголков установлена на четыре привода, каждый из которых имеет в составе мотор-редуктор, кривошип, который тягами соединен с платформой. Такая конструкция позволяет получить как боковое смещение платформы для имитации ветровой нагрузки, так и наклоны для тренировки статической устойчивости стрелка. Мотор-редукторы

установлены на раме, сваренной из прямоугольных труб.

На раме находится электрический разъем, посредством которого приводы подключаются к схеме управления. Положение элементов приводов измеряется резистивными датчиками угла поворота.

Схема управления собрана на микроконтроллере АТМega32. Микроконтроллер управляет 4 электродвигателями постоянного тока, подключенными через H-мосты на транзисторах, что позволяет реверсировать двигатели и плавно изменять их скорости вращения при управлении транзисторами в режиме ШИМ. Обратная связь по угловому положению валов двигателя осуществляется потенциометрами, которые подключены к аналоговым входам микроконтроллера. Управление устройством осуществляется с персонального компьютера, который сопрягается с микроконтроллером через преобразователь USB/RS-232 и преобразователь уровней.

В ходе тренировки вес тела стрелка с оружием равномерно распределен на обе ноги. В процессе тренировки электродвигатели создают медленные, плавные, постоянно меняющиеся относительно вертикальной и горизонтальной осей колебания движущейся платформы. Платформа со стрелком качается под различными углами, достаточно медленно, чтобы стрелок успевал держать оружие в области прицеливания, но без рывков и, в тоже время, без остановки. Стрелок

вынужден постоянно удерживать оружие с помощью мышц, которые при обычной тренировке находятся в статике или просто выключены, либо включаются в удержание оружия, когда стрелок чувствует, что ему не хватает устойчивости оружия. Таким образом, за счет использования в тренировочном процессе движущейся платформы осуществляется повышение координационных способностей и статической устойчивости у стрелка. Т. е. многократно повторенное упражнение в созданных условиях искусственной управляющей среды приводит к мышечному запоминанию тренирующимся стабильной и правильной изготровки, которая является естественной именно для него и позволяет добиться устойчивости конструкции стрелко-оружие, для осуществления качественного прицеливания и производства результативного выстрела.

Устройство может быть использовано как для тренировок спортсменов высокого класса, так и для тренировки начинающих биатлонистов, а также для тренировки стрелков-спортсменов, военных, работников силовых структур.

Литература

1. Устройство для тренировки стрелков: пат. 2665247 РФ, МПК А63В 22/14 / С. М. Долгих, А. В. Игнатенко, А. В. Малышко; заявл. 22.09.2017; опубл. 24.05.2018. – 12 с.

УДК 616-77;539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРА-ЛОВУШКИ

Савченко А. Л.¹, Богдан П. С.¹, Кондратьева Н. А.¹, Шумская А. П.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ЧПУП «ТЕРМОЛЕКС»

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе приведены результаты теоретического исследования и прочности зацепа тубулярного фильтра при извлечении фильтра-ловушки из вены. Рассмотрены модели нагружения зацепа при его различной форме и проанализированы рациональные геометрические параметры зацепа. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании эндопротезов сосудов.

Ключевые слова: фильтр-ловушка, извлечение, моделирование, напряжения, проектирование.

MODELING OF CAVA-FILTER ELEMENTS

Savchenko A. L.¹, Bogdan P. S.¹, Kondratyeva N. A.¹, Shumskaya A. P.²

¹Belarusian National Technical University

²"TERMOLEX", Minsk, Belarus

Abstract. This paper presents the results of a theoretical study of the strength of a tubular filter hook during cava-filter extraction from a vein. Loading models for hooks of various shapes are considered, and rational geometric parameters for the hook are analyzed. The modeling results can be used in the design of vascular endoprostheses.

Keywords: cava-filter, extraction, modeling, stress, design.

Адрес для переписки: Савченко А. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

Кава-фильтр – это эндопротез из нитинола. Он предназначен для имплантации в просвет нижней поллой вены – главной крупной вены, собирающей кровь от нижних конечностей и органов таза и несущей ее к сердцу и легким.

Установка фильтра – это метод профилактики жизнеугрожающего осложнения – ТЭЛА (тромбозомболии легочной артерии). Основная задача кава-фильтра – механически улавливать кровяные

сгустки, которые двигаются с током крови из вен ног или таза, и не допустить их попадания в легкие.

Временные фильтры устанавливаются на определенный период, пока риск ТЭЛА высок, а затем подлежат удалению.

Основные причины для удаления:

- истек период высокого риска ТЭЛА;
- пациент стабильно принимает антикоагулянты (препараты, разжижающие кровь), которые достаточно защищают его от тромбов;
- профилактика долгосрочных осложнений, связанных с самим фильтром.

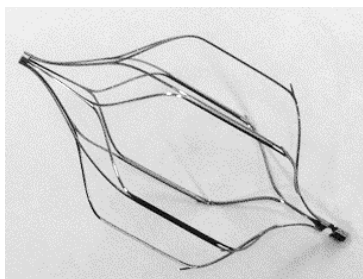


Рисунок 1 – Раскрытый фильтр-ловушка

Обычно срок нахождения фильтра в вене составляет от 1 до 6 месяцев после установки. Если фильтр остается дольше, он может обрасти тканью и прирасти к стенке вены, что сделает его удаление крайне сложным или невозможным.

Для извлечения под местной анестезией через небольшой разрез в вену вводится интродьюсер. Под постоянным контролем рентгенотелевидения врач проводит через интродьюсер специальный катетер к месту расположения фильтра в нижней полой вене. Для точной визуализации может вводиться рентгеноконтрастное вещество. Через катетер к фильтру подводится специальное устройство для захвата. Хирург цепляет его за верхний крючок для извлечения. Фильтр при этом складывается, захватывая в свою конструкцию возможные мелкие тромбы. После надежного захвата фильтр извлекается через интродьюсер наружу [1]. В некоторых случаях возможна поломка крючка на фильтре.

В [2] авторы рассмотрели некоторые вопросы расчета элементов фильтра.

Был рассмотрен тубулярный фильтр, изготавливаемый резкой из нитиноловой трубки в условиях Научно-технологического парка БНТУ «Политехник». Конструкция фильтра схожа с Ortease Retrieable Vena-cava-Filter (Cordis, USA) [3] и показана на рисунке 1.

Крючок-зацеп получают прорезкой паза в тубчатой заготовке. На рисунке 1 крючок хорошо виден справа.

Крючок при удалении фильтра должен быть проверен на разрыв и срез в месте контакта с петлей для извлечения. Так как форма крючка обеспечивает симметричное нагружение, а цилиндрическая форма имеет высокую изгибную жесткость, проverka на изгиб может не выполняться.

Для выбора оптимальной геометрии крючка-зацепа, обеспечивающей максимальную прочность, было выполнено моделирование в Solid-Works. Задавались различные углы расположения паза и его размеры относительно диаметра трубки. При этом оценивались напряжения и деформации в трубке.

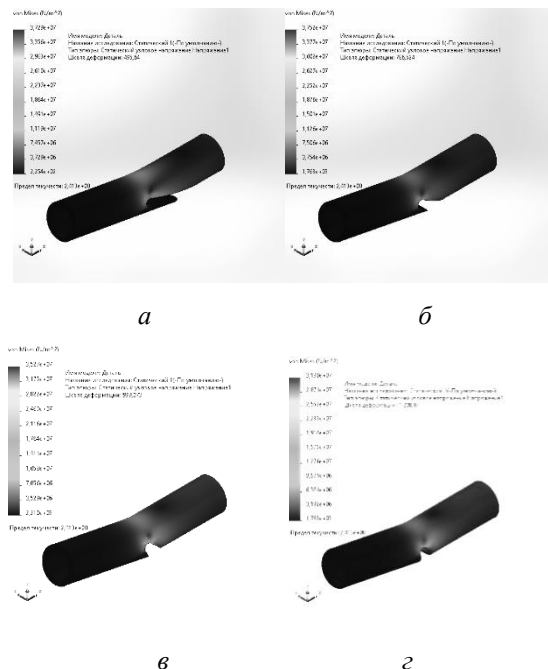


Рисунок 2 – Напряжения и деформации при изменении угла наклона паза: 15° (а); 30° (б); 45° (в); 60° (г)

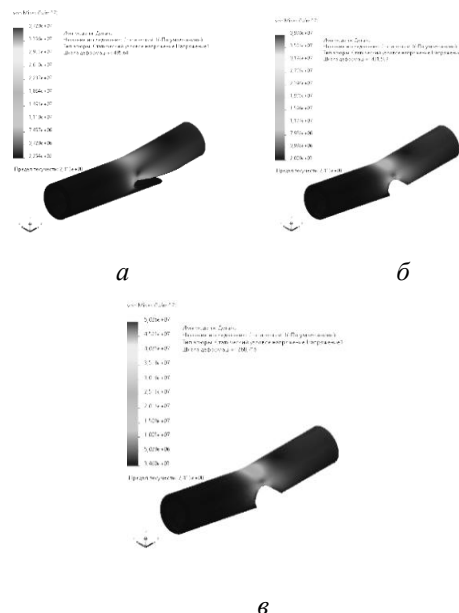


Рисунок 3 – Напряжения и деформации при изменении относительной ширины паза: 0,2 (а); 0,4 (б); 0,5 (в)

Угол наклона паза задавался в диапазоне 15...60° относительно оси трубки. Такой диапазон удобен для захвата фильтра и для резки на лазерной установке.

Ширина паза задавалась относительно диаметра трубки в диапазоне 0,2...0,5. Пазы такой ширины характерны для конструкций аналогов.

Некоторые результаты моделирования показаны на рисунках 2 и 3.

Из результатов исследования зависимости напряжений и деформаций от угла наклона паза (рисунок 2) можно сделать вывод, что при увеличении угла напряжения и деформации растут, однако после примерно 30° рост замедляется. С другой стороны, увеличение угла увеличивает удобство для хирурга при зацепе фильтра. Вероятно, можно рекомендовать угол в 45° как одновременно обеспечивающий удобство работы, прочность и жесткость.

Из результатов исследования зависимости напряжений и деформаций от относительной ширины паза (рисунок 3) можно сделать вывод, что увеличение ширины паза приводит к ослаблению конструкции, причем после значения этого параметра примерно 0,4 дальнейшее увеличение приводит к резкому снижению прочности и жесткости.

Поэтому можно рекомендовать минимальную ширину паза, при которой хирургу будет все еще удобно выполнять захват фильтра специальным приспособлением. Это могут быть значения в диапазоне примерно от 0,25 до 0,35.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании фильтров-ловушек и других эндопротезов сосудов.

Литература

1. Однопросветная унилатеральная техника удаления кава-фильтра / А. Г. Виллер [и др.] // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н. И. Пирогова. – 2018. – № 3. – С. 141–143.
2. Савченко, А. Л. К вопросу проектирования элементов фильтра-ловушки / А. Л. Савченко, А. П. Шумская // Приборостроение-2024: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–29 нояб. 2024 г. – Мн.: Интегралполиграф, 2024. – С. 255–256.
3. Hoppe, H. Optional Vena Cava Filters. Indications, Management, and Results / H. Hoppe // Deutsches Ärzteblatt International. – 2009. – № 24. – P. 395–491.

УДК 621.941.025.1:616-71

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИТИ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА РЕЗАНИЕМ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКОГО ФЕТРА Сидоренко К. Р., Вершина Г. А.

ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены способы получения фторопластовой нити, такие как экструзия и точение лезвийным инструментом, произведен анализ технологии ее получения резанием и перспективы использования в медицине при производстве фетра. В процессе экструзии происходит изменение структуры самого материала по всему объему, что негативно сказывается на его свойствах. Резание позволяет сохранить исходную структуру материала, однако требует использования специального лезвийного режущего инструмента. Проанализирован процесс резания фторопластовой нити и предложена теоретическая конструкция режущего лезвия.

Ключевые слова: стент-графт, ePTFE, политетрафторэтилен, резание материалов, геометрические параметры инструмента, нить, фетр.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF MAKING POLYTETRAFLUOROETHYLENE THREAD BY CUTTING AND ITS USE FOR THE PRODUCTION OF MEDICAL FELT Sidorenko K. R., Vershina G. A.

State enterprise “Science and technology park of BNTU «Polytechnic””, Minsk, Belarus

Abstract. The article discusses the methods of obtaining fluoroplastic yarn, such as extrusion and turning with a blade tool, analyzes the technology of its production by cutting and the prospects for use in medicine in the production of felt. During the extrusion process, the structure of the material itself changes throughout the volume, which negatively affects its properties. Cutting allows you to preserve the original structure of the material, but requires the use of a special blade cutting tool. The process of cutting a fluoroplastic thread is analyzed and the theoretical design of the cutting blade is proposed.

Keywords: stent graft, ePTFE, polytetrafluoroethylene, cutting materials, geometric parameters of the tool, thread, felt.

Адрес для переписки: Сидоренко К. Р., Сурганова 47/1, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sidorikkirill@gmail.com

В современном мире для удовлетворения нужд человека в народном хозяйстве и промышленности используются различные типы материалов: чистые металлы, сплавы, неметаллы и т.д. Однако все большую популярность набирают полимерные материалы и композиции на их основе. Одним из таких материалов является

политетрафторэтилен (тефлон, ПТФЭ). Этот уникальный материал обладает широким спектром уникальных свойств: он химически инертен к любым средам, обладает диэлектрическими свойствами, гидрофобностью, а также эластичностью в сочетании с высокой механической прочностью [1].

Особое внимание фторопласт обрел в конце 50-х годов, когда его предложили использовать в производстве медицинских изделий, в частности лент, нитей и тканей, которые в дальнейшем используются для производства стент-графтов. По мнению J. H. Harrison наиболее пригодным для медицинских целей, в частности для протезов кровеносных сосудов, является тефлон, относящийся к группе политетрафторэтиленов. Тефлон обладает очень высокой прочностью, почти абсолютной инертностью, ткани живого организма мало реагируют на присутствие этого синтетического материала. Было установлено, что фиброзная выстилка, образующаяся на внутренней поверхности тефлонового протеза, оказывается более тонкой, чем в дакроновом протезе. Это снижает частоту тромбозов, особенно в протезах небольшого калибра. Тефлон является несмачиваемым волокном, что оказалось выгодным, так как уменьшало опасность тромбозов и способствовало быстрому прорастанию окружающих тканей через поры протеза [2]. Современные компании, такие как Jostent, Graftmaster, Abbott Vascular; Symbiot, Boston Scientific и другие, занимаются производством аортальных стент-графтов с использованием биосовместимого расширенного политетрафторэтилена (ePTFE). Наиболее близкими по своим параметрам являются ткани из фторопласта, которые изготавливаются из нитей. На сегодняшний день существует несколько способов получения нитей из фторопласта: экструзия и резание. В процессе экструзии фторопласт подвергается термическому и силовому воздействию: происходит нагрев фторопластовых заготовок и проталкивание их через матрицу. Такое воздействие приводит к изменению структуры самого материала по всему объему, что негативно сказывается на его свойствах, которые критически важны при использовании его в качестве покрытия, особенно медицинских изделий. Резание фторопласта позволяет сохранить исходную структуру материала, однако требует использования специального лезвийного режущего инструмента.

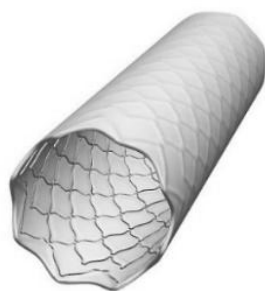


Рисунок 1 – Стент-графт BeGraft компании Bentley InnoMed GmbH (Германия)

Анализ литературных источников на тему лезвийной обработки материалов показал актуальность данного типа обработки. Необходимым условием данного процесса является оптимальная форма режущего лезвия. Для благоприятного

и беспрепятственного схода нити по лезвию оно должно обладать большим передним углом, а также минимальным задним углом для уменьшения трения по обработанной поверхности фторопластовой заготовки. Также критически важен радиус закругления при вершине резца, поскольку он напрямую влияет на шероховатость обработанной поверхности. Большая шероховатость поверхности будет сильнее влиять на размеры получаемых мелкогабаритных деталей. В соответствии с работой [3] параметры режущего инструмента имеют широкие пределы. В частности, передний угол равен $\gamma = 60-70^\circ$, задний угол $\alpha = 4^\circ$, угол заострения $\beta = 15-25^\circ$. Однако физические характеристики фторопластовых композиционных материалов и обстоятельства выбора параметров режущего инструмента является актуальной задачей. Например, углы резца, представленные выше, требуют теоретического обоснования.

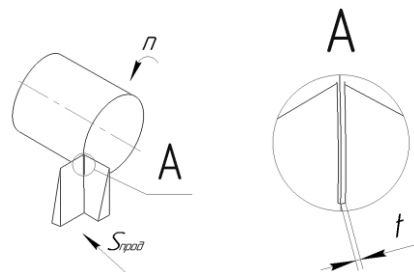
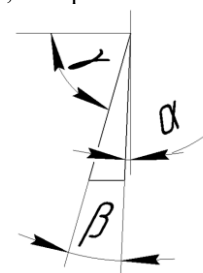


Рисунок 2 – Схема резания фторопластовой нити

Данный резец в ходе исследования нами был адаптирован для получения нити, а также составлены схема резания фторопласта для получения нитей лезвийным инструментом, представленная на рисунке 2, и геометрическая схема расположения углов лезвия, изображенная на рисунке 3.



γ – передний угол, α – задний угол, β – угол заострения

Рисунок 3 – Расположение углов лезвия

В рамках исследования были проведены ряд экспериментов по точению фторопласта стандартным и лезвийным инструментом с разными геометрическими параметрами и режимами резания, в ходе которых измерялись усилия резания. Так, при использовании обычного проходного резца со стандартными геометрическими параметрами, силы резания составляли от 500 до 2000 Н. В то же время при использовании лезвийного резца силы резания имели значения от 5 до 15 Н. Для получения фторопластовых изделий в виде

тонких нитей следует провести теоретические исследования, обосновать и оптимизировать геометрические параметры режущего инструмента.

Производимая непрерывная нить в дальнейшем будет использоваться для создания медицинского фетра. Дополнительно для повышения качества как нити, так и готового фетра, мы предлагаем вариант финишной обработки фторопластовой нити методом ультразвукового упрочнения.

Таким образом анализ технологий получения фторопластовых нитей и экспериментальные данные позволили нам установить параметры и их диапазоны для режущего инструмента, которые оказывают решающую роль в получении тонкой

нити, и перспективы ее использования при производстве медицинского фетра.

Литература

1. Вершина, Г. А. Особенности изгиба фторопластовой ленты с учетом разномодульности материала / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 185–194.
2. Протезы кровеносных сосудов. История вопроса // Hospsurg.online: [сайт]. – URL: <https://hospsurg.online/content/view/630/> (дата обращения: 15.09.2025).
3. Способ изготовления длинномерных изделий: пат. SU 1337273 A1, МПК B29C 37/00 / В. М. Жарнов; опубл. 15.09.1987.

УДК 615.8:621.3

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АППАРАТА ТЕРМОМАГНИТОТЕРАПИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Степаненко А. И.^{1,2}, Савченко А. Л.²

¹ООО «Технология и Медицина 2030»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. В данной научной работе разбираются технические условия аппарата термомангнитотерапии «ТМТ-ТМ» с магнитной индукцией 0,1 Тл и частотой 5–15 Гц с рабочей температурой 35–38 °С в соответствии с медицинскими стандартами. Используется устройство для восстановления функций спортсменов после травм. Изучено влияние параметров на заживление тканей. Предложены варианты дальнейшей доработки технических условий для будущих редакций.

Ключевые слова: термомангнитотерапия, реабилитация, технические условия, спортивная медицина.

PAPER VALIDATION OF TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR THERMOMAGNETIC THERAPY DEVICES FOR FUNCTIONAL REHABILITATION OF ATHLETES IN BIOMEDICAL ENGINEERING

Stepanenko A.I.^{1,2}, Savchenko A. L.²

¹LLC “Technology and Medicine 2030”

²Belarussian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. This scientific paper examines the technical specifications of the TMT-TM thermomagnetic therapy device with a magnetic induction of 0.1 T and a frequency of 5–15 Hz, operating at a temperature of 35–38 °C in accordance with medical standards. The device is used to restore the functions of athletes after injuries. The influence of parameters on tissue healing has been studied. Options for further refinement of the technical specifications for future editions have been proposed.

Keywords: thermomagnetic therapy, rehabilitation, technical specification, sports medicine.

Адрес для переписки: Степаненко А. И., пр. Победителей, 135, г. Минск 220060, Республика Беларусь
e-mail: stepanenko.al3x@mail.ru

Травмы опорно-двигательного аппарата являются распространенной проблемой в профессиональном спорте, требуя эффективных методов реабилитации для быстрого восстановления атлетов неинвазивного применения [1]. Термомангнитотерапия сочетает импульсное магнитное поле треугольной или синусоидальной формы и тепловое воздействие. Такая комбинация стимулирует регенерацию тканей и улучшает микроциркуляцию [2]. Аппарат «ТМТ-ТМ», разработанный ООО «Технология и Медицина 2030», предназначен для функциональной реабилитации спортсменов в

условиях здравоохранения и образования [3]. Цель статьи – анализ технических условий (ТУ) аппарата, их соответствия медицинским стандартам и предложение идей для дополнения для будущих редакций рассматриваемых технических условий.

Аппарат «ТМТ-ТМ» разработан для применения комбинированного воздействия с учетом стандартов безопасности во время проведения процедур [1]. Ключевые параметры ТУ для устройства представлены в таблице 1.

После проведения производственно-технических испытаний доказано, что аппарат соответ-

ствует ГОСТ 15150 (УХЛ4.2) и ГОСТ 30324.0, обеспечивая устойчивость к климатическим и механическим воздействиям (вибрация 10–55 Гц, температура ± 50 °C) [3]. Безопасность устройства подтверждена соответствием СанПиН №9-29-95 и ГОСТ Р МЭК 60601-1-2022: уровень радиопомех не превышает норм для медоборудования, а корпус (пластик ABS, поликарбонатная пленка) устойчив к дезинфекции 3 %-м раствором перекиси водорода [3], что критично для использования в спортивных центрах, где проводится регулярная дезинфекция.

Таблица 1 – Параметры аппарата ТМТ

Параметр		
Амплитуда магнитной индукции	0,1 Тл ($\pm 0,01$ – 0,02 Тл)	Стимулирует клеточный метаболизм, способствует регенерации мышц и снижению воспаления [2]
Частота магнитного поля	5–15 Гц	Ускоряет восстановление мягких тканей и суставов [4]
Температура воздействия	35–38 °C (шаг 1 °C)	Улучшает кровоток [1]
Безопасность	Класс II, тип В (ГОСТ 30324.0)	Защищает от электротока, минимизирует ЭМ-помехи (<4 А/м) [5]
Надежность	Срок службы 2 года, работа 8 ч	Обеспечивает стабильность в условиях интенсивного использования [1]

Термоманнитотерапия воздействует на ткани через магнитное поле и тепло. Магнитное поле 0,1 Тл с частотой 5–15 Гц стимулирует ионы клеток, ускоряя регенерацию и снижая болевой синдром [2, 4]. Температура 35–38 °C усиливает кровоток, что важно для восстановления после травм связок и мышц у спортсменов [1]. Аппарат «ТМТ-ТМ» с циклическим режимом работы (30 мин) и синусоидальной формой импульсов обеспечивает приятное для пациента воздействие, минимизируя риски перегрева тканей [3].

При рассмотрении технических условий были обнаружены некоторые упущения моментов, важных для биомедицинского физиотерапевтического оборудования, которые стоило бы включить в будущие редакции. Во-первых, отсутствует описание биосовместимости материалов на клеточном уровне. Рекомендуется добавить требования по ГОСТ ISO 10993-11-2021 для оценки цитотоксичности и аллергенных реакций при контакте с кожей спортсменов [2, 4].

Также ТУ не содержат спецификаций по эргономике индуктора и манжет, адаптированных для разных частей тела (например, колено, плечо). В будущих редакциях стоит включить параметры эргономики, такие как гибкость материалов и размеры для различных антропометрических групп, чтобы повысить удобство в спортивных условиях [1].

Еще в ТУ фокусируются лишь на базовой надежности (срок службы 2 года), но игнорируют аспекты энергоэффективности и экологичности производства. В редакциях рекомендуется добавить требования к снижению энергопотребления (ниже 500 Вт) и полную оценку жизненного цикла устройства по ГОСТ Р ИСО 14001-2016, учитывая утилизацию [3, 5]. Эти дополнения сделают ТУ более полными для современных стандартов биомедицинской инженерии.

В заключении данной научной работы можно сказать, что аппарат «ТМТ-ТМ» соответствует требованиям биомедицинской инженерии, обеспечивая безопасность и эффективность в реабилитации спортсменов. Параметры ТУ (магнитное поле 0,1 Тл, частота 5–15 Гц, температура 35–38 °C) оптимизированы для стимуляции регенерации тканей и улучшения кровотока. Выявленные упущения, такие как биосовместимость, эргономика, рекомендуется устранить в будущих редакциях ТУ. Работа демонстрирует важность инженерных решений в создании медицинских устройств для спортивной медицины.

Литература

1. Markov, M. S. Pulsed electromagnetic field therapy: History, mechanisms, and current clinical applications / M. S. Markov // Bioelectromagnetics. – 2007. – Vol. 28, № 7. – P. 506–515.
2. Pilla, A. A. Nonthermal electromagnetic fields: From basic mechanisms to therapeutic applications / A. A. Pilla // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2013. – Vol. 32, № 2. – P. 123–136.
3. Аппарат термоманнитотерапии «ТМТ-ТМ»: техн. условия ТУ ВУ 193363639.003-2025. – Мн.: Технология и Медицина 2030, 2025. – 50 с.
4. Ross, C. L. The use of magnetic field for the reduction of inflammation: A review of the cellular and molecular mechanisms / C. L. Ross, B. S. Harrison // Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. – 2013. – Vol. 7, № 4. – P. 243–250.
5. ГОСТ Р МЭК 60601-1-2022. Медицинское электрооборудование. Общие требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 198 с.

СЕКЦИЯ 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.382

ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ

Абрамов С. А.¹, Бринкевич Д. И.¹, Просолович В. С.¹,
Зубова О. А.², Черный В. В.³, Вабищевич С. А.⁴

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

⁴Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
Новополоцк, Беларусь

Аннотация. Методами отражательно-абсорбционной ИК-Фурье-спектроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и индентирования исследованы пленки негативных фоторезистов (ФР) KMP E3502, AZ nLOF 2020, 2070 и 5510 толщиной 0,9–6,0 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Ионное травление приводило к увеличению микротвердости структур ФР/кремний, обусловленному сшиванием молекул фоторезиста. Существенной трансформации отражательно-абсорбционных спектров не наблюдалось. Имело место только смещение максимума первой интерференционной полосы в высокоэнергетическую область, обусловленное уменьшением толщины пленки. Экспериментальные данные объяснены с учетом сшивания молекул и конформационных изменений в структуре основного компонента ФР при ионном травлении; ориентацией молекул вблизи границы раздела ФР/Si и наличием в пленках остаточного растворителя.

Ключевые слова: негативный фоторезист, элементный состав, ИК спектроскопия, микроиндентирование, ионное травление.

ION ETCHING OF PHENOL-FORMALDEHYDE PHOTORESISTS FOR LIFT-OFF LITHOGRAPHY

Abramov S. A.¹, Brinkevich D. I.¹, Prosolovich V. S.¹, Zubova O. A.², Chernyi V. V.³, Vabishchvich S. A.⁴

¹Belarusian State University

²“INTEGRAL” Joint Stock Company

³Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

⁴Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk
Novo Polotsk, Belarus

Abstract. Films of negative photoresists (PR) KMP E3502, AZ nLOF 2020, 2070 and 5510 with a thickness of 0,9– 6,0 microns deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation have been studied using IR-Fourier spectroscopy of diffuse reflection, X-ray spectral microanalysis and indentation. Ion etching led to an increase in the microhardness of photoresist/silicon structures due to crosslinking of photoresist molecules. No significant transformation of the diffuse reflection spectra was observed. There was only a shift of the maximum of the first interference band to the high-energy region due to a decrease in the film thickness. The experimental data are explained by taking into account the crosslinking of molecules and conformational changes in the structure of the main component of PR during ion etching; the orientation of molecules near the PR/Si interface and the presence of residual solvent in the films.

Keywords: negative photoresist, elemental composition, IR spectroscopy, microindentation, ion etching.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Введение. Негативные фоторезисты (ФР) KMP E3502 (производитель Kempur Microelectronics Inc, Китай) и AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 (MicroChemicals GmbH, Германия) предназначены для использования в технологии формирования контактной металлизации полупроводниковых пластин методом обратной (lift-off) литографии, что требует высокой температурной стойкости (более 250 °С) фоторезиста. Кроме того, в состав фоторезистов для lift-off литографии входят сшивающие соединения. В качестве пленкообразующего полимера

в этих фоторезистах используются олигомеры фенолформальдегидных смол. Фоторезисты серии AZ nLOF 20XX работают на принципе «химического усиления» и в своем составе дополнительно содержат компонент, способствующий формированию отрицательного угла наклона маски фоторезиста [1]. Цель настоящей работы – исследование влияния ионного травления на элементный состав, оптические и прочностные свойства пленок негативного фоторезистов KMP E3502, AZ nLOF 2020, 2070 и 5510 на кремнии.

Материалы и методы измерений. Пленки фоторезистов AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZn LOF 5510 (MicroChemicas Gmbh, Германия) и KMP E3502 (Kempur Microelectronics, Китай) толщиной 0,9–6,0 мкм наносились на поверхность пластин кремния с ориентацией (100) методом центрифугирования [2]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования фоторезистивной пленки проводилась ее сушка при 110 °С длительностью 60 с. Часть образцов впоследствии подвергалась ионному травлению в течение 20 мин в потоке ионов Ag⁺ (скорость потока 6 см³/мин) с энергией 160 эВ.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 при комнатной температуре. Измерения микротвердости выполнялись по стандартной методике [4]. Нагрузка на индентор варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с.

ИК-Фурье спектры структур ФР/Si регистрировались в диапазоне 400–4000 см⁻¹ при комнатной температуре спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH). Использовалась приставка для измерения диффузного отражения. Для исследования отражательно-абсорбционных ИК спектров использовалась приставка для диффузного отражения. В данном случае спектры поглощения слоями ФР формировались в результате прохождения зондирующего ИК излучения через слой в сторону кремниевой подложки, его зеркального отражения от подложки и обратного прохождения излучения через слой ФР. Разрешение было не хуже 4 см⁻¹. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением. Измерение геометрической толщины пленок ФР выполнялось на растровом электронном микроскопе HITACHI S-4800 (таблица).

Таблица 1 – Толщина (в мкм) ФР пленок

Фоторезист	Исходный	Ионное травление
AZn LOF 2020	5,95–6,05	5,67–5,75
AZn LOF 2070	5,83	5,56
AZn LOF 5510	0,985–0,992	0,890–0,926
KMPE 3502	5,88–5,95	5,71–5,83

Эксперимент. Ионное травление приводило к смещению максимумов интерференционных полос в отражательно-абсорбционных ИК спектрах ФР пленок в высокоэнергетическую область (рисунок 1). Оно обусловлено уменьшением толщины пленки и зависело от вида фоторезиста. Так в пленках серии AZ nLOF 20XX уменьшение толщины пленки составляло 0,25–0,30 мкм или ~ 5 %, в AZ nLOF 5510 – 0,08 мкм (9 %), а в KMP E3502 – около 0,10 мкм (~2 %). Отметим, что наличие в ФР пленке остаточного растворителя в заметных количествах приводило к разбуханию пленки, увеличению ее толщины и исчезновению из ее

отражательно-абсорбционного спектра интерференционных полос, что свидетельствовало об ухудшении однородности ФР пленки. Разбухание пленки усиливалось при увеличении содержания остаточного растворителя. Существенного изменения энергетического положения и интенсивности полос поглощения в отражательно-абсорбционных спектрах после ионного травления ФР пленок не наблюдалось.

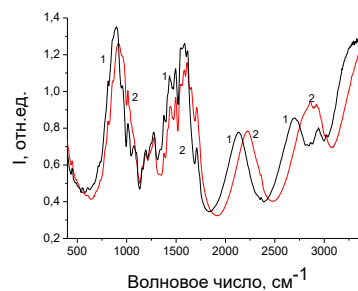


Рисунок 1 – Отражательно-абсорбционные ИК спектры исходной (1) и ионотравленной (2) пленок AZ nLOF 2070 толщиной 5,83 мкм

Ионное травление приводило к охрупчиванию и увеличению микротвердости всех исследованных ФР пленок, особенно сильно это проявлялось при малых нагрузках, влияние кремниевой подложки было не существенно. Это обусловлено формированием ковалентных сшивок между полимерными цепями по всей толщине пленки, в том числе за область пробега ионов.

Ионное травление ФР пленок приводило к разложению приповерхностного слоя фоторезиста и формированию на поверхности углеродистого слоя, кардинальным образом изменяющего процессы растворения фоторезистивной пленки в спиртовых растворах. После ионного травления растворение пленок идет по трещинам в сформированном углеродистом слое.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»).

Литература

1. Кузнецова, Н. А. Отечественный фоторезист для взрывной фотолитографии / Н. А. Кузнецова, Р. Д. Эрлих, В. В. Соловьев // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2017. – Вып. 1(165). – С. 44–46.
2. Reflection spectra modification of diazoquinone-novolac photoresist implanted with B and P ions / D. I. Brinkevich [et al.] // Russian Microelectronics. – 2019. – Vol. 48, № 3. – P. 197–201.
3. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazo-quinone-Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich [et al.] // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, № 6. – P. 1352–1357.

УДК 620.1.08

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ НЕЙТРОННЫХ И СИНХРОТРОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Алтынбаев Е. В.^{1,2}, Гоголинский К. В.^{1,2}, Гуревич В. Л.³, Хейфец М. Л.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина, Россия

³ИПФ НАНБ, Минск, Беларусь

Аннотация. Доклад посвящен анализу проблем внедрения методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования структуры и свойств материалов. Рассмотрены задачи метрологического обеспечения и стандартизации прикладных нейтронных и синхротронных методов, предложены пути их решения и представлены аннотации конкретных проектных предложений.

Ключевые слова: нейтронные методы, синхротронные методы, метрология, стандартизация.

PROBLEMS OF METROLOGY AND STANDARDIZATION FOR NEUTRON AND SYNCHROTRON METHODS OF THE MATERIALS STRUCTURE AND PROPERTIES INVESTIGATION

Altynbaev E. V.^{1,2}, Gogolinskii K. V.^{1,2}, Gurevich V.L.³, Kheifets M. L.³

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²NRC "Kurchatov Institute" – PINP, Gatchina, Russia

³Institute of Applied Physics NASB, Minsk, Belarus

Abstract. This report presents the analysis of the challenges of implementation of neutron scattering and synchrotron radiation methods of study of the structure and properties of materials. The challenges of metrological support and standardization of applied neutron and synchrotron methods are examined, solutions are proposed, and abstracts of specific project proposals are presented.

Keywords: neutron methods, synchrotron methods, metrology, standardization.

Адрес для переписки: Гоголинский К.В., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 188300, Россия,

г. Гатчина, Орлова Роуца, д.1

e-mail: nanoscan@yandex.ru

Современные методы нейтронного рассеяния, а именно нейтронной томографии, стресс-дифрактометрии, текстурной дифрактометрии и малоуглового рассеяния нейтронов, являются высокоэффективными методами неразрушающего контроля (НК) материалов. Во многих высокотехнологичных отраслях промышленности имеется значительная потребность в технологиях контроля атомной и микроструктуры материалов и напряженно-деформированного состояния (НДС), которые могут быть реализованы на базе нейтронных методов. Практическое решение этих задач затруднено ввиду отсутствия современной нормативной базы и метрологического обеспечения, что существенно ограничивает внедрение нейтронных методов НК в технологиях, относящихся к сфере государственного регулирования. Кроме того, имеющаяся научно-исследовательская инфраструктура слабо ориентирована на решение задач промышленности.

Для решения этих проблем в настоящее время разработан Отдельный научно-технический проект Союзного государства «Создание системы метрологического обеспечения измерений параметров напряженно-деформированного состояния на базе нейтронной стресс-дифрактометрии» (Нейтронная

метрология). В рамках проекта предлагается: создать установку нейтронной стресс-дифрактометрии (SD-1) с уникальными техническими и метрологическими характеристиками на базе исследовательского РК ПИК; разработать и аттестовать референтную методику измерения параметров НДС методом нейтронной стресс-дифрактометрии; разработать средства и методы передачи единиц параметров НДС средствам измерений и методикам измерений; организовать работы по стандартизации в области средств и методов нейтронной стресс-дифрактометрии.

Дополнительно в настоящее время прорабатывается возможность применения комплементарных к нейтронным синхротронным методам путем создания исследовательского комплекса на базе синхротронного источника «СКИФ», который должен будет включать в себя методы синхротронной томографии и радиографии, стресс-дифрактометрии синхротронного излучения и рентген-флюоресцентной спектроскопии. Приоритетной задачей, на решение которой направлено создание комплекса, является его использование для решения задач формирования метрологического обеспечения контроля качества изделий и аттестации технологических процессов аддитивных производств.

УДК 620.1.08

ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ

Алтынбаев Е. В.^{1,2}, Гоголинский К. В.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина, Россия

Аннотация. В докладе представлено описание наиболее перспективных методов рассеяния нейтронов на выведенных пучках для их внедрения в интересы высокотехнологичной промышленности, а именно: нейтронная радиография, стресс-дифрактометрия, малоугловое рассеяние нейтронов.

Ключевые слова: нейтронная радиография, стресс-дифрактометрия, малоугловое рассеяние нейтронов.

APPLIED METHODS OF NEUTRON SCATTERING FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS

Altynbaev E. V.^{1,2}, Gogolinsky K. V.^{1,2}

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²National Research Center "Kurchatov Institute" – PNPI, Gatchina, Russia

Abstract. The report presents a description of the most promising methods of neutron scattering on extracted beams for their implementation in the interests of high-tech industry, namely: neutron radiography, stress diffraction, small-angle neutron scattering.

Keywords: neutron radiography, stress diffraction, small-angle neutron scattering.

Адрес для переписки: Алтынбаев Е.В., Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 188300, Россия, г. Гатчина, Орлова Роца, д.1
e-mail: e.altynbaev@spbu.ru

Методы рассеяния нейтронов на выведенных пучках являются мощным инструментом для исследования структуры и динамики материалов на атомном и молекулярном уровнях. Эти методы широко применяются в физике конденсированного состояния, химии, биологии и материаловедении. В основе этих методов лежит анализ взаимодействия нейтронов с веществом, что позволяет получать информацию о структуре, магнитных свойствах и других характеристиках материала.

Существуют следующие основные методы рассеяния нейтронов в области материаловедения:

Дифракция нейтронов используется для изучения кристаллической структуры материалов. Ввиду нулевого заряда, нейтроны рассеиваются на атомных ядрах, в результате, анализ дифракционной картины позволяет определить положение атомов в кристаллической решетке, в том числе их смещение относительно невозмущенного состояния. Данный метод особенно полезен для изучения легких элементов (например, водорода), которые слабо рассеивают рентгеновские лучи, а также поиска различных изотопов.

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) применяется для исследования наноструктур, таких как полимеры, коллоиды, биологические макромолекулы. Метод МУРН позволяет изучать объекты и неоднородности в материалах размером от 1 до 1000 нм.

Методы нейтронной визуализации (радиография и томография) используется для исследования материалов и их неоднородностей на масштабах от 30 мкм до 1000 см.

Высокая проникающая способность нейтрона, в силу его нулевого заряда, предоставляет уникальные возможности по неразрушающему контролю объемных образцов, например, изделий аддитивных производств. Возможность изотопного контрастирования позволяет эффективно контролировать процессы заводораживания, охрупчивания, радиационных повреждений и окисления материалов. Кроме того, использование такой особенности нейтрона, как ненулевой спин, позволяет эффективно исследовать не только атомную, но и магнитную структуру вещества.

УДК 697.92

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

Антошин А. А.¹, Галузо В. Е.², Шалик А. А.³

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

³ Ассоциация лабораторий «Компетентность»

Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен метод определения положения мерного сечения и координат точек измерений аэродинамических характеристик в воздуховодах систем вентиляции.

Ключевые слова: аэродинамические испытания, системы вентиляции, мерное сечение, координаты точек измерения.

GUIDELINES FOR MEASURING AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF VENTILATION SYSTEMS

Antoshin A. A.¹, Haluzo V. E.², Shalik A. A.³

¹ Belarusian National Technical University

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

³ Competence Laboratory Association

Minsk, Belarus

Abstract. A method for determining the position of the measuring section and the coordinates of the measurement points of aerodynamic characteristics in the air ducts of ventilation systems is proposed.

Keywords: aerodynamic tests, ventilation systems, measured section, coordinates of measurement points.

Адрес для переписки: Галузо В. Е., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: valga51@yandex.ru

Испытательные лаборатории, аккредитованные на аэродинамические испытания систем вентиляции, в своей деятельности должны руководствоваться актуальными техническими нормативно-правовыми актами (ТНПА), регламентирующими методики их проведения. Но эти ТНПА в основе своей ссылаются на далеко неактуальный [1]. При этом важно не то, что этот ТНПА прошлого века, а то, что в нем есть очевидные несоответствия.

В разделе, посвященном методу выбора точек измерений, указываются требования по определению положения мерного сечения для измерения давления и скорости воздуха в воздуховоде. Согласно [1] это сечение должно располагаться на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров D_h за местом возмущения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ним. Вероятно, это необходимо для того, чтобы проводить измерения в стационарном ламинарном потоке при постоянной по величине скорости потока воздуха. В то время как обтекание отводов, диафрагм и других элементов сети приводит к вихреобразованию (турбулентности). При этом при отсутствии прямолинейных участков необходимой длины допускается располагать мерное сечение в месте, делящем выбранный для измерения участок в отношении 3:1 D_h в направлении потока воздуха.

В то же время, согласно [1], допускается размещать мерное сечение непосредственно в месте внезапного расширения или сужения потока. При этом размер мерного сечения принимают соответствующим наименьшему сечению канала. В таком случае совершенно непонятно зачем тогда надо было определять D_h и с учетом его численного значения определять положение мерного сечения.

Предлагается располагать мерное сечение в том участке воздуховода, где в проекте указан объемный расход воздуха, для проверки его численного значения и проводятся испытания. При этом этот участок делить по длине 3:1 в направлении потока воздуха не учитывая диаметр воздуховода.

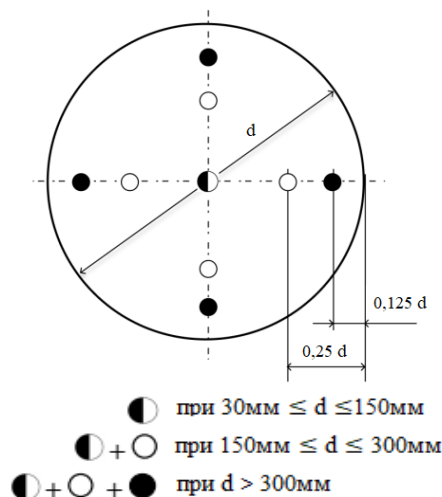


Рисунок 1 – Координаты точек измерения давлений и скоростей в воздуховодах круглого сечения

В [1] приведен чертеж, для определения координат точек измерения давлений и скоростей в воздуховодах «цилиндрического сечения». В первую очередь некорректно «цилиндрического сечения». Сечение не может быть «цилиндрическим». В сечении может быть окружность или круг. При этом указывается, что максимальное отклонение координат точек измерений от указанных на чертеже не должно превышать ± 10

%. Но как быть с координатой точки $0,054 D_h$, так как при возможном $D_h = 100$ мм, координата равна 5,4 мм, а погрешность ее измерения не должна превышать 0,54 мм. Не ясно каким средством измерения обеспечить такую точность.

Кроме того, точки измерения расположены непосредственно у внутренней стенки воздуховода, где будет иметь трение о стенки воздуховода, которое учитывается в проекте при определении потерь давления в вентиляционной сети. А значит скорость в этих точках может быть ниже, чем в центре. То есть заведомо определяется меньшее значение скорости воздуха, которая может дать заниженное значение объемного расхода воздуха.

Предлагается следующий вариант координат точек измерения давлений и скоростей в воздуховодах круглого сечения (рисунок 1), предложенный в [2].

В [1] приводится формула для расчета гидравлического диаметра D_h

$$D_h = 4F / \Pi, \quad (1)$$

где F , m^2 и Π , m , соответственно, площадь и периметр сечения воздуховода.

Но в случае круглого сечения для определения площади F необходимо знать диаметр воздуховода, который фактически равен D_h , то есть возникает неопределенность.

При этом в [1] не указывается как измерять диаметр воздуховода. В то же время поскольку

в (1) указан периметр Π , то диаметра D_h предлагается определять по измеренной длине окружности C воздуховода в мерном сечении с помощью рулетки измерительной с плоской измерительной лентой согласно ГОСТ 7502-98 по формуле

$$D_h = C / 3,14. \quad (2)$$

Фактическое значение диаметра D_h сравнивают с указанными в проекте. При отклонении фактического размера от проектного на величину не более 5 мм принимают значение, указанное в проекте, так как размеры воздухопроводов нормируются [3], а отклонение может быть обусловлено погрешностью измерений и включает удвоенную толщину материала, из которого изготовлен воздухопровод, а в случае, спирально-навивного воздуховода - толщину фальцевого замка.

Литература

1. ГОСТ 12.3.018-79. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – Введ. 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 18 с.
2. АМИ.МН 0006-2021. Параметры дымовых и вентиляционных каналов. Кратность воздухообмена в помещениях зданий. Методика измерений. – Введ. 01.01.2021. – М.: Ассоциация металлургов, 2021.
3. СТБ 1915-2020. Воздуховоды металлические вентиляционные. Технические условия. – Введ. 2020-01-01. – Мн.: БелГИСС, 2020. – 24 с.

УДК 697.92

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПАСПОРТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

Антошин А. А.¹, Галузо В. Е.², Калита Е. В.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

Аннотация. Предложены практические рекомендации по измерению скорости воздуха в системах вентиляции и определения полного и статического давлений, развиваемых вентилятором.

Ключевые слова: аэродинамические испытания, системы вентиляции, измерение скорости воздуха, полное и статическое давление вентилятора.

PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR CERTIFICATION OF VENTILATION SYSTEMS

Antoshin A. A.¹, Haluzo V. E.², Kalita E. V.²

¹ Belarusian National Technical University

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus

Abstract. Practical recommendations are proposed for measuring air velocity in ventilation systems and determining the total and static pressures developed by the fan.

Keywords: aerodynamic testing, ventilation systems, air velocity measurement, fan total and static pressure.

Адрес для переписки: Галузо В. Е., ул. П. Бровки, 6, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru

В соответствии с [1] при приемочном контроле систем вентиляции (СВ) оформляются паспорта на каждую систему по установленным в этом документе формам.

Эти формы в ключают в себя объемный расход воздуха и давление, развиваемое вентилятором, характеризующие производительность вентилятора. В результате контроля устанавливается соответ-

ствие фактических численных значений этих параметров, указанным в проекте.

Измерения расхода воздуха и давления вентилятора осуществляются в соответствии с [1], которое считается обязательным к применению. Однако в [1] есть ряд несоответствий, которые мы предлагаем исключить.

Расход воздуха определяется на основании измерения его скорости перемещения в мерном сечении и площади мерного сечения.

Одним из несоответствий является то, что раздел 2 в [1] называется «Аппаратура», что никак не согласуется с [2,3], в которых говорится о средствах измерений (СИ), включенных в государственный реестр СИ. В [1] указывается, что анемометры по ГОСТ 6376–74 и термоанемометры должны применяться для измерения скоростей воздуха менее 5 м/с, а при скоростях воздуха более 5 м/с должен применяться комбинированный приемник давления для измерения динамического давления потока, по измерениям которого определяется скорость движения воздуха. При этом в примечании указывается, что при измерениях скоростей воздуха, превышающих 5 м/с в потоках, где затруднено применение приемников давления, допускается использовать анемометры по ГОСТ 6376–74 и термоанемометры. Но при этом не оговариваются критерии этих «затруднений» и получается, что можно измерять скорость без увеличения погрешности и анемометром. В государственном реестре СИ есть анемометры, измеряющие скорость более 10 м/с. Определение скорости через динамическое давление, предполагает измерение влажности воздуха, его температуры и давления в воздуховоде. Что касается давления, то в пояснении формулы для расчета плотности воздуха, значение которой необходимо для определения скорости воздуха опять есть неопределенность. В пояснении сказано, что в формуле используется полное или статическое давление потока, но это же разные давления, отличающиеся численно. Но самое немаловажное то, что неопределенность определения объемного расхода воздуха по скорости, рассчитанной через динамическое давление согласно [1] составляет около 30%, при том, что согласно [4] допускается отклонение фактического значения объемного расхода воздуха от проектного 10 %.

Предлагается измерять скорость воздуха в воздуховодах без ограничения ее численного значения анемометрами с телескопическим зондом testo 405-V1, testo 405i, testo 416, testo 425.

При испытаниях (СВ) с механическим побуждением проверяются аэродинамические характеристики (АДХ) вентилятора. В частности, измеряется объемный расход воздуха через вентилятор L_v и развиваемое им при этом давление P_v . Обе эти характеристики указываются в проекте для выбранного по ним вентилятора. Выбор вентилятора производится по АДХ вентилятора, приведенным в каталогах завода-изготовителя. Измерение P_v необходимо для проверки правильности

расчета потерь давления в вентиляционной сети. При некорректном расчете выбранный вентилятор может не обеспечивать необходимый объемный расход воздуха L_v . Следует иметь ввиду то, что АДХ $L_v(P_v)$, может быть приведена для разных давлений: полного $P_{пв}$ и статического $P_{св}$. В частности, в каталоге ООО «ВЕЗА» АДХ вентиляторов КРОС и КРОВ приведены для $P_{св}$, а вентиляторов ВРАН – для $P_{пв}$ [5].

Потери давления в СВ определяются потерями давления на местные сопротивления и рассчитываются согласно [6] по формуле

$$P = \sum P_{дi} \cdot \zeta_i, \quad (1)$$

где $P_{дi}$ – динамическое давление в расчетном элементе сети,

ζ_i , – коэффициент местного сопротивления расчетного элемента сети [6].

Потери в сети представляют собой статическое давление. Для обеспечения необходимого расхода L_v , вентилятор должен развивать это давление.

В [1] приводятся выражения и методики определения потерь (падений) давления в (СВ) и на вентиляторе. При этом полное давление в сети $P_{п}$ или ее участке определяется как сумма статического $P_{сi}$ и динамического $P_{дi}$ давлений в i -м мерном сечении.

Однако вызывают сомнение другие формулы. В частности, в [1] статическое давление $P_{св}$ вентилятора определяют по формуле

$$P_{св} = P_{с2} - P_{с1} - P_{д1}, \quad (2)$$

где $P_{с2}$ и $P_{с1}$ – соответственно статические давления в мерных сечениях 1 и 2 перед и за вентилятором, $P_{д1}$ – динамическое давление в мерном сечении 1, на входе в вентилятор.

Эта формула не имеет смысла. Так как, если бы из полного давления вычли динамическое, то получилось бы статическое, а если бы к статическому добавили динамическое, то получилось бы полное.

Статическое давление вентилятора $P_{св}$ должно рассчитываться по формуле

$$P_{св} = P_{с2} - P_{с1}, \quad (3)$$

где $P_{с2}$ и $P_{с1}$ – соответственно статические давления в мерных сечениях 1 и 2 перед и за вентилятором.

Что же касается полного давления вентилятора, то согласно [1] оно определяется по формуле

$$P_{пв} = P_{п2} - P_{п1}, \quad (4)$$

где $P_{п2}$ и $P_{п1}$ – соответственно полные давления в мерных сечениях 1 и 2 перед и за вентилятором. Но согласно физическим представлениям, как уже было отмечено, и в том числе [1] полное давление равно сумме статического и динамического давлений.

$$P_{п} = P_{с} + P_{д}. \quad (5)$$

Если расписать выражение (4) в соответствии с (5), то получится с учетом того, что при равных размерах входного и выходного сечения вентилятора значения динамического давления и их знак (положительный) не меняются

$$P_{ПВ} = (P_{C2} + P_{Д}) - (P_{C1} + P_{Д}) = P_{C2} - P_{C1} \quad (6)$$

С учетом того, что P_{C1} отрицательное, а P_{C2} положительное, то можно записать (6) в следующем виде:

$$P_{ПВ} = |P_{C2}| + |P_{C1}|, \quad (7)$$

то есть получается, что согласно [1] полное давление вентилятора равно его статическому, которое равно потерям статического давления в вентиляционной сети рассчитываемым проектировщиком. В то же время в каталогах заводов-изготовителей указывается, что полное давление вентилятора складывается из потерь статического давления в вентиляционной сети и динамического давления на выходе вентилятора. Таким образом формула для расчета полного давления вентилятора $P_{ПВ}$ должна выглядеть следующим образом

$$P_{ПВ} = |P_{C2}| + |P_{C1}| + P_{ДВ}, \quad (8)$$

где $P_{ДВ}$ – динамическое давление вентилятора, значение которого приведено либо на графике

АДХ вентилятора, либо в таблице для данного типоразмера вентилятора, измеренное на выходе вентилятора.

Литература

1. ГОСТ 12.3.018-79. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – Введ. 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 18 с.
2. СП 4.02.07-2024. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений. Контроль качества работ. – Введ. 01.01.2024.
3. НПБ 23-2010. Противодымная защита зданий и сооружений. Методы приемо-сдаточных и периодических испытаний. – Введ. 01.01.2010.
4. СП 1.03.02-2020. Монтаж внутренних инженерных систем зданий и сооружений. – Введ. 01.01.2020.
5. Оборудование для противодымной вентиляции // ВЕЗА: [сайт]. – URL: <https://www.veza.ru/> (дата обращения: 20.01.2025).
6. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 – М.: Стройиздат, 1992.

УДК 681

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ ДОЗИМЕТРИИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА – ИЗЛУЧЕНИЯ

Асадчая Д. Ю., Соломахо В. Л.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Развитие и распространение источников высокоэнергетического гамма – излучения приводит к появлению ряда научно – практических задач: радиационного контроля и радиационной защиты. При решении таких задач для спектрометрических и дозиметрических измерительных приборов в фотонных полях возникает необходимость работы в диапазоне энергий 10 МэВ. В работе рассмотрена современная эталонная база Республики Беларусь в области дозиметрии, выделены факторы, ограничивающие функциональные возможности существующего национального эталона и определены основные пути его усовершенствования.

Ключевые слова: национальный эталон, дозиметрия, гамма – излучение, рентгеновское излучение, модернизация эталона.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE REFERENCE BASE IN THE FIELD OF X-RAY AND GAMMA RADIATION DOSIMETRY

Asadchaya D. Y., Solomakho V. L.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The development and proliferation of high-energy gamma radiation sources has led to a number of applied problems, including radiation monitoring and radiation protection. Solving these problems for spectrometric and dosimetric measuring instruments in photon fields requires operation in the energy range up to 10 MeV. This paper examines the current dosimetry reference framework of the Republic of Belarus, highlights the factors limiting the functionality of the existing national reference standard, and identifies key avenues for its improvement.

Keywords: national standard, dosimetry, gamma radiation, X-ray radiation, modernization of the standard.

Адрес для переписки: Асадчая Д. Ю., пер. Корженевского, 20, 79, г. Минск 220024, Республика Беларусь
e-mail: AsadchayaDY@gmail.com

Для решения задач радиационного мониторинга необходимо использовать дозиметрические средства измерений с известной дозовой характеристикой и энергетической зависимостью чувствительности. Исследование энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений при их производстве и настройке предполагает использование источников рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне энергий (например, от 40 кэВ до 3 МэВ).

Как правило, дозиметрические средства измерений калибруются или поверяются на эталонных

дозиметрических установках с использованием источников гамма-излучения [1]. Набор гамма-источников, входящий в состав эталонных установок, ограничен стоимостью или периодом распада радионуклидов. На практике в большинстве случаев в состав эталонных дозиметрических установок входят такие источники гамма-излучения, как: ^{241}Am (59,6 кэВ), ^{57}Co (122 кэВ), ^{137}Cs (662 кэВ) и ^{60}Co (1173 и 1333 кэВ). Как известно, основой обеспечения единства измерений физических величин являются национальные эталоны, предназначенные для воспроизведения и (или)

хранения единиц физических величин и передачи их размеров нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений. В области дозиметрии в Беларуси функционируют государственные национальные эталоны единиц:

- кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе НЭ РБ 7-01;
- активности радионуклидов НЭ РБ 37-18;
- объемной активности радона в воздухе НЭ РБ 41-18;
- индивидуального и амбиентного эквивалента мощности дозы бета – излучения НЭ РБ 55-19.

В работе особый интерес вызывает национальный эталон кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе НЭ РБ 7-01, который был создан и введен в эксплуатацию в 2001 году.

Национальный эталон состоит из:

- дозиметр Unidos webline T10021 с ионизационной камерой M30010;
 - дозиметр UNIDOS с ионизационными камерами M32002 и M32003;
 - дозиметр Unidos webline T10021 с ионизационной камерой для рентгеновских измерений Exradin A3;
 - рентгеновский мультиметр Piranha;
 - рентгеновская установка PANTAK 320HF № 9711-2970 с наборами фильтров серии NARROW SPECTRUM по стандартам ISO 4037 и серии RQR по IEC 61267 и набором свинцовых коллиматоров;
 - измерительная тележка с принадлежностями;
 - облучатель ОБ-2;
 - облучатель ОБ-6;
 - панорамный облучатель ОБ-34;
 - фантом MR 5101-T с адаптером MR5101A-1.
- Составные части эталона представлены на рисунках 1–3.

Эталон позволяет количественно оценить дозу ионизирующего излучения, что важно для медицинских и научных применений, связанных с радиационной защитой и контролем качества излучения.

Номинальные значения или диапазон воспроизведения и (или) хранения единицы величины:

Керма в воздухе (7E-09 – 3E+06) Гр

Мощность кермы в воздухе (7E-10 – 4,5E+01) Гр/с

Воспроизведение полей рентгеновского и гамма-излучения (1 – 20 000) нГр/с

В соответствии с требованиями международных стандартов МЭК для приборов радиационного мониторинга окружающей среды, например, вокруг АЭС должен быть определен энергетический диапазон до 7 МэВ. Это требование обусловлено гамма-излучением от ядерной реакции $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$, протекающей в водном охлаждающем контуре с энергией 6,13 МэВ. [2, 3] Требования МЭК по расширению энергетического диапазона измерения мощности дозы до 10 МэВ распространяются к дозиметрам и мониторам для использования на рабочем месте персонала и во время аварийных ситуаций. Рекомендации по расширению энергетического

диапазона высокочувствительных дозиметров для измерения мощности кермы в воздухе в диапазоне от 30 нГр/ч до 30 мкГр/ч и мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в диапазоне от 30 нЗв/ч до 30 мкЗв/ч до 7 МэВ также прописаны в стандартах МЭК.

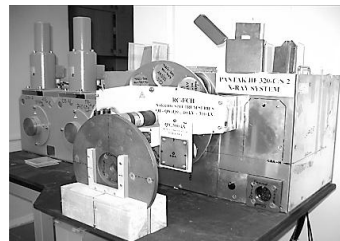


Рисунок 1 – Гамма- и рентгеновский облучатели с коллимационным узлом и комплектом фильтров

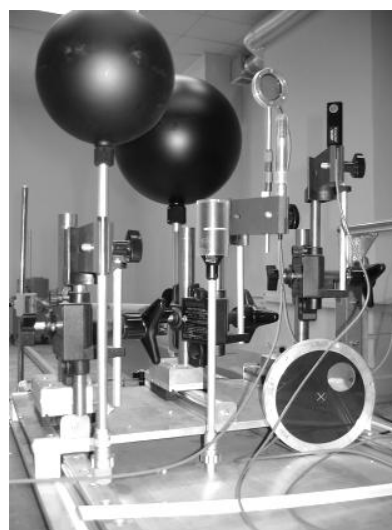


Рисунок 2 – Комплект ионизационных камер



Рисунок 3 – Рентгеновский мультиметр Piranha

В соответствии с государственной поверочной схемой для эталонных измерений используются радионуклиды ^{137}Cs (0,662 МэВ) и ^{60}Co (1,250 МэВ). Калибровка и поверка ядерно-физической аппаратуры в полях с энергиями более 3 МэВ в настоящее время не осуществляется.

Формирования эталонных калибровочных полей гамма – излучения с более высокими ($E > 3$ МэВ) энергиями, требует значительного количества дорогостоящего лабораторного оборудования и обслуживания, которое доступно нескольким ведущим националь-

ным институтам, так же возникают трудности в эксплуатации такого оборудования, необходимость в квалифицированных кадрах, требования по радиационной безопасности.

Таким образом, необходимо расширить диапазон воспроизведения и передачи значений мощности кермы в воздухе от $0,5 \cdot 10^{-12}$ до $6,0 \cdot 10^{-3}$ Гр/с и реализовать погрешность воспроизведения единицы мощности кермы в воздухе гамма - излучения не более 2 %, выполнение которых позволит повысить достоверность результатов измерений.

Литература

1. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 // Atomtex: [сайт]. – URL: http://atomtex.com/sites/default/files/catalogue_ru.pdf (дата обращения: 20.12.2025).
2. Itsumasa, U. Systematics of Gamma-Ray Energy Spectra for Classification of Workplaces around a Nuclear Facility / U. Itsumasa, T. Tadashi // Japanese Journal of Health Physics. – 1988. – Vol. 3. – P. 1440–1443.
3. Rogers, D. O. A nearly mono-energetic 6–7 MeV photon calibration source / D. O. Rogers // Health Physics. – 1983. – Vol. 45, № 1. – P. 127–137.

УДК 620.179.14/15

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ СТРЕЛОК ПО ДАННЫМ МАГНИТОШУМОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Бусько В. Н.¹, Свибович И. В.², Бурдо М. В.²

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Беларусь

Аннотация. Оценка и неразрушающий контроль магнитных свойств магнитных стрелок, применяемых в различных электронно-измерительных, навигационных и геодезических приборах, относится к важным и актуальным задачам при обеспечении необходимой точности и проведении поверочных и профилактических работ. На примере двух экземпляров, используемых в ориентирах-буссолях магнитных стрелок, выполнены экспериментальные исследования возможности оценки их магнитных свойств с помощью относящегося к магнитным, метода эффекта Баркгаузена. Магнитные свойства оценивались путем сканирования накладным магнитошумовым преобразователем по длине и обеим сторонам стрелок и анализа данных. Установлены неоднородность магнитных свойств по длине магнитных стрелок с обеих сторон, их плечей и различие между образцами. Показана возможность применения данного метода и аппаратуры для контроля качества магнитных свойств магнитных стрелок.

Ключевые слова: магнитные свойства магнитных стрелок, компас, буссоль, неразрушающий контроль, магнитошумовой метод.

EVALUATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE MAGNETIC ARROWS OF DEVICES ACCORDING TO THE MAGNETO-NOISE CONTROL METHOD

Busko V. N.¹, Svibovich I. V.², Burdo M.V.²

¹Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences

²Research and Development Unitary Enterprise “Research and Technical Centre «LEMT» BelOMO”

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Evaluation and non-destructive testing of the magnetic properties of magnetic arrows used in various electronic measuring, navigation and geodetic instruments is one of the important and urgent tasks in ensuring the necessary accuracy and carrying out verification and preventive maintenance. Using the example of two examples of magnetic arrows used in bussoli landmarks, experimental studies have been carried out on the possibility of evaluating their magnetic properties using the magnetic method of the Barkhausen effect. The magnetic properties were evaluated by scanning an overhead magneto-noise transducer along the length and both sides of the arrows and analyzing the data. Magnetic inhomogeneity along the length of the magnetic arrows on both sides and the difference between the samples are established. The possibility of using this method and equipment for quality control of magnetic properties of magnetic arrows is shown.

Keywords: magnetic properties magnetic arrows, compass, bussole, non-destructive testing, magneto-noise method technical

Адрес для переписки: Бусько В. Н., ул. Академическая, 16, Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Входной и текущий неразрушающий контроль (НК) магнитных свойств магнитной стрелки различных электронно-измерительных, навигационных, геолого- и геодезических приборов с ориентиром-буссолью является необходимой процедурой. Так, проверка и текущий НК, к примеру, буссоли, является неотъемлемой мерой при/перед ее использовании. Это особо актуально там, где

необходимо получить высокую точность и достоверность определения азимута, которые, преимущественно, зависят от магнитных свойств стрелки.

Контроль магнитной стрелки, кроме визуальной оценки ее способности ориентироваться вдоль внешнего магнитного поля (к примеру, Земли) и фиксации данного направления,

отстройки от влияния мешающих внешних магнитных полей, включает периодический контроль ее собственных магнитных свойств. Магнитные свойства стрелки зависят от многих факторов, начиная от материала, из которого она изготовлена и заканчивая условиями эксплуатации, хранения, периодичности и качества обслуживания, учета влияния внешних электромагнитных полей, человеческого фактора и др.

Независимо от предназначения и задач прибора или устройства, где используется магнитная стрелка, ее магнитные свойства, влияющие на точность, во многом, зависят от ферромагнитного материала, из которого она изготовлена. Магнитные стрелки изготавливают из ферромагнитного (магнитомягкого, магнитотвердого) материала, или сплава на основе редкоземельных элементов, обладающего более стабильной во времени и максимальной магнитной энергией.

При оценке и изучении возможности применения магнитошумового метода для НК магнитных свойств стрелок использовались две магнитные стрелки длиной 76 мм, шириной 3 мм и толщиной 0,42–0,44 мм, полученные от УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО». Внешний вид обеих магнитных стрелок от буссоли показаны на рисунке 1.

В качестве метода оценки и контроля магнитных свойств использовался метод эффекта Баркгаузена (МЭБ) [1], относящийся к магнитным методам НК, который является универсальным, интегральным и высокочувствительным к изменению магнитных свойств благодаря связи с доменной структурой материала стрелки.

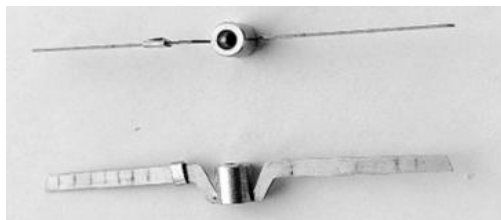


Рисунок 1 – Внешний вид используемых при исследовании магнитных стрелок

На магнитные свойства стрелки также влияют химический состав, качество изготовления (недопустимо наличие изгибов по длине), механические напряжения, технологическая и наведенная анизотропия, структурная неоднородность физико-механических свойств, магнитная индукция, магнитная проницаемость, напряженность поля, естественное старение, деградация (снижение основных свойств), уровень внешних магнитных полей, условия эксплуатации и хранения.

Измеряемым и информативным параметром оценки магнитных свойств (качества) магнитной стрелки являлась интенсивность (уровень) магнитного шума (МШ), равная среднеквадратичному значению ЭДС (в мВ, отн. ед.), измеряемая магнитошумовым анализатором типа ИМШ-1, принцип работы которого основан на реализации МЭБ [2; 1]. Использовались три типа накладных

преобразователей Баркгаузена (ПБ), отличающихся конструкцией, габаритами и техническими характеристиками.

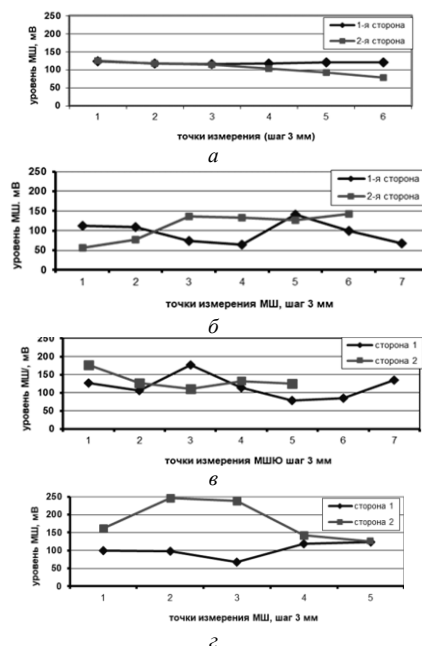


Рисунок 2 – Результаты сканирования ПБ по длине двух магнитных стрелок от буссолей для левого и правого плеча относительно центральной оси стрелок для обеих их сторон: а, б – стрелка № 1, сторона 1 и сторона 2 (обратная); в, г – стрелка № 2, сторона 1 и сторона 2 (обратная)

На рисунке 2, а – г для примера представлены экспериментальные зависимости уровня МШ при сканировании ПБ с высокой локальностью измерений МШ с шагом 3 мм по поверхности обеих сторон для двух магнитных стрелок для левого и правого плеча относительно их центра. Площадь S измерительной катушки этого ПБ составляла 2 мм², расстояние между полюсами магнитопровода намагничивающей обмотки 3 мм. Из анализа кривых зависимостей уровня МШ от координаты перемещения ПБ видно, что для обеих сторон левого плеча магнитные свойства стрелки № 1 (рисунок 2, а, б), по данным МЭБ, близки между собой. Для правого плеча стрелки № 1 уже наблюдается различие по ее длине и видна магнитная неоднородность. Для магнитной стрелки № 2 (рисунок 2, в, г) для левого плеча стрелки также наблюдается незначительная неоднородность магнитных свойств по длине их обеих сторон. В то же время для правого плеча этой стрелки между ее сторонами наблюдается существенное различие по уровню МШ и неоднородности, что недопустимо. Анализ причины показал, что геометрия плеча этой стрелки была нарушена вследствие изгиба ее части, что привело к росту напряжений растяжения, росту уровня МШ и неоднородности.

Таким образом, экспериментальным путем и на основе анализа данных четко выявлена неоднородность магнитных свойств по длине обеих

магнитных стрелок, зависимость уровня МШ от их сторон и существенная разница между обоими образцами, влияющими на их магнитные свойства. Для повышения чувствительности МЭБ к изменению и НК магнитных свойств стрелок необходимо применять ПБ с высокой локальностью измерений МШ. В этом случае МЭБ можно использовать при оценке и контроле магнитных свойств магнитных стрелок в любых измерительных и навигационных приборах.

УДК 658.562

FMEA КАК ИНСТРУМЕНТ ПОИСКА СКРЫТЫХ ПОТЕРЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ванцева М. С., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается актуальная для белорусских предприятий задача системного выявления и устранения скрытых потерь в контексте реализации государственной политики повышения эффективности производства. Предлагается обоснование и применение адаптированной методологии FMEA в качестве основного аналитического инструмента для решения задачи поиска и количественной оценки не рисков, а операционных потерь.

Ключевые слова: бережливое производство, методика поиска скрытых потерь, FMEA.

THE RELEVANCE OF THE SCIENTIFIC DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF "LEAN MANUFACTURING" WITHIN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Vantsava M. S., Serenkov P.S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article considers a task relevant for Belarusian enterprises of systemic identification and elimination of hidden losses in the context of implementation of state policy to increase production efficiency. It is proposed to use the adapted FMEA methodology as the main analytical tool for solving the task of finding and quantifying not risks, but operational losses.

Keywords: lean manufacturing, hidden waste analysis method, FMEA.

*Адрес для переписки: Фурс М. С. пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mariya.sergeevna.furs@gmail.com*

Бережливое производство – это концепция управления бизнесом, основанная на постоянном стремлении к полному устранению всех видов потерь. Бережливое производство вовлекает всех сотрудников в процесс оптимизации бизнеса и делает акцент на клиентоориентированности. Эта концепция возникла на основе интерпретации американских исследователей, изучающих феномен производственной системы Toyota [1].

В. А. Каптурович под «бережливым производством» понимает сложный процесс, который базируется на собственной философии, ценностях и принципах [2].

О. М. Мещерякова считает, что «Бережливое производство» – концепция управления производственным предприятием, которая основана на постоянном стремлении предприятия к устранению всех видов потерь [3].

Несмотря на широкое распространение инструментов бережливого производства, сохраняется существенный методологический пробел в области идентификации и оценки неочевидных (скрытых) операционных потерь: в принципе отсутствует специализированный инструмент, позволяющий

Литература

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 1980-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 26 с.
2. Бусько, В. Н. Методика механических испытаний и исследование возможности контроля усталостной прочности магнитошумовым методом стальных образцов, изготовленных по аддитивной технологии / В. Н. Бусько, А. П. Ничипурук, А. Н. Сташков // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 54–63.

осуществлять количественную оценку и сравнительное ранжирование различных видов потерь. Существующие подходы носят преимущественно описательный и качественный характер, выполняя функцию констатации факта наличия потерь, но не предоставляя механизма для их объективного сопоставления. Критически важная для обоснованного принятия управленческих решений задача определения количественного приоритета потерь с целью оптимального распределения ограниченных ресурсов на улучшения остается нерешенной. Данная проблема особенно актуальна в свете реализации государственной политики в области повышения эффективности, формализованной в Программе деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы и новом национальном стандарте СТБ 2672-2025, который требует внедрения системного, а, следовательно, измеримого и верифицируемого подхода к управлению потерями.

Традиционные системы менеджмента рисков, к которым относится и широко применяемый анализ видов и последствий потенциальных отказов (FMEA), зачастую оказываются неэффективными для решения данной задачи.

Как правило, классический подход FMEA фокусируется на оценке критических рисков в области безопасности, качества и надежности продукции, игнорируя при этом обширный пласт ежедневных операционных неэффективностей. Многие бизнес-процессы теряют свою эффективность не столько из-за глобальных сбоев, сколько вследствие кумулятивного эффекта микро-потерь: нерационального использования рабочего времени, перерасхода материалов и энергоресурсов, нереализованного потенциала сотрудников. Данные потери, будучи распределенными во времени и не приводящими к моментальным критическим последствиям, редко фиксируются в стандартных отчетных формах. Однако их постоянное накопление создает значительную «упущенную выгоду», приводит к системному снижению производительности и, как следствие, подрывает долгосрочную конкурентоспособность предприятия.

Традиционно анализ видов и последствий отказов (FMEA) применяется для оценки рисков в области безопасности, качества и надежности. Однако потенциал данного метода для диагностики ресурсоэффективности систем остается недооцененным.

Ключевая концепция адаптации методики заключается в смене парадигмы. Мы смещаем фокус анализа с поиска критических сбоев на проактивный поиск и количественную оценку операционных потерь. Вместо вопроса «Что может сломаться?» мы задаемся вопросом «Где и какие ресурсы мы теряем?».

Основной методики для идентификации «потерь» служит проверенная временем классификация из философии Бережливого производства (Lean) – знаменитые 8 видов потерь: перепроизводство, ожидание, лишняя транспортировка, излишняя обработка, избыток запасов, ненужные перемещения, дефекты и нереализованный потенциал сотрудников. Данная классификация служит структурированным чек-листом и, что более важно, аналитической картой, которая направляет эмпирическое исследование. Она позволяет:

- систематизировать процесс наблюдения за операционной деятельностью;
- категоризировать выявленные неэффективности по универсальным и признанным типам;
- квалифицировать потери, отличая фундаментальные проблемы от их симптомов;
- приоритизировать области для последующей оптимизации, фокусируя усилия на наиболее значимых источниках неэффективности.

Ключевое звено методики: переопределение шкал для расчета приоритетного числа потерь (ПЧП).

Самое важное методологическое изменение – это переосмысление классических оценочных шкал FMEA. Мы рассчитываем не приоритетное число риска, а приоритетное число потерь (ПЧП).

Влияние. Мы оцениваем не тяжесть последствий для клиента или безопасности, а финансовый или операционный ущерб. Это может быть потеря времени (минуты/часы), денег (стоимость

материалов, энергии), или мощностей. Шкала калибруется в денежных единицах или часах.

Частота. Оценивается, как часто возникает данная конкретная потеря: ежесекундно (в непрерывном процессе), ежечасно, ежедневно или ежемесячно. Это прямая мера масштаба явления.

Обнаружаемость. Эта шкала получает новое, критически важное значение. Высокий балл теперь выставляется самым скрытым, трудно обнаруживаемым потерям, которые не видны в текущих системах учета и отчетности. Низкий балл – потерям, которые легко отследить. Это позволяет целенаправленно охотиться за «слепыми зонами» процессов, которые и наносят наибольший совокупный ущерб. И соответственно ПЧП определяется по формуле (1):

$$\text{ПЧП} = \text{Влияние} \times \text{Частота} \times \text{Обнаруживаемость}, \quad (1)$$

Чем выше число ПЧП, тем более скрытая, частая и дорогостоящая потеря требует немедленного внимания.

Данный подход трансформирует FMEA из реактивного инструмента обеспечения надежности в проактивный инструмент повышения операционной эффективности и экономической оптимизации.

Результатом применения методики является:

- систематический и количественный перечень скрытых потерь, ранжированных по степени их влияния на финансовый результат. Это больше не «ощущения», а объективные данные.

- веское обоснование для инвестиций в улучшения (автоматизацию, обучение, редизайн процессов). Руководство получает понятный бизнес-кейс, где каждый проект по улучшению подкреплен расчетом потенциальной экономии.

Мощный аналитический каркас FMEA интегрируется с философией непрерывного улучшения (Kaizen), создавая гибридный инструмент с исключительной практической ценностью.

Адаптация FMEA для поиска потерь открывает для предприятий новое измерение в работе с процессами. Это позволяет не просто предотвращать сбои и брак, а целенаправленно искать точки роста, снижая себестоимость и повышая продуктивность на основе данных.

Этот подход превращает FMEA из узкоспециализированного инженерного инструмента, пылящегося на полке до следующего аудита, в стратегический ресурс финансового и операционного менеджмента. Это эволюция от контроля качества к управлению ценностью, где каждый неоптимизированный процесс рассматривается как возможность для роста и повышения конкурентоспособности.

Литература

1. Эффект на 1 млн: как предприятия реализуют проекты ЮНИДО по бережливому производству // БЕЛТА: [сайт]. – URL: <https://belta.by/comments/view/effekt-na-1-mln-kak-predpriyatija-realizujut-proekty-junido-po-berezhlivomu-proizvodstvu-5896>.
2. Система бережливого производства: методика 5S // Standartno.by: [сайт]. – URL: <https://standartno.by/blog/>

articles/ management-system/ qms-iso-9001/ sistema-berezhlivogo-proizvodstva-metodika-5s.

3. Бережливое производство: учеб.-метод. пособие / – Мн., 2013. – URL: <https://pdf.vlib.by/BEREZHLIVOST-2013/EFU-01-2008.pdf>.

4. Болигатова, Е. Бережливое производство становится стандартом ведения бизнеса // Министерство экономики Республики Беларусь: [сайт]. – URL: <https://economy.gov.by/ru/news-ru/view/elena-boligatova-berezhlivoe-proizvodstvo-standartom-vedeniya-biznesa-50395-2025>.

УДК 342.641

МАРКИРОВКА ТОВАРОВ СРЕДСТВАМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Гузкова Ю. А.¹, Давыдова Е. А.², Алексеевич А. О.²

¹Аппарат Совета Министров Республики Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В условиях современной рыночной экономики, характеризующейся высокой конкуренцией и постоянно растущими требованиями к качеству и безопасности продукции, обеспечение прослеживаемости товаров становится одной из ключевых задач для производителей и поставщиков. Прослеживаемость представляет собой систему контроля и учета перемещения продукции на всех этапах цепочки поставок – от производителя до конечного потребителя. Это позволяет не только повысить доверие к продукции, но и снизить риски возникновения контрафакта, улучшить качество товаров и обеспечить их соответствие требованиям законодательства. **Ключевые слова:** идентификация, прослеживаемость, цифровая маркировка, средства идентификации.

LABELING OF GOODS BY IDENTIFICATION MEANS

Guzkova Y. A.¹, Davidova E. A.², Alekseevich A. O.²

¹Office of the Council of Ministers of the Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. In today's market economy, characterized by high competition and ever-increasing demands for product quality and safety, ensuring product traceability has become a crucial task for manufacturers and suppliers. Traceability refers to the system of monitoring and recording the movement of products throughout the supply chain, from the manufacturer to the end consumer. This not only enhances product credibility but also reduces the risk of counterfeit goods, improves product quality, and ensures compliance with legal requirements.

Keywords: identification, traceability, digital marking, and identification tools.

Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by

Развитие технологий идентификации и маркировки товаров в цепях поставок в сочетании с развитием интернет-ориентированных приложений фиксации процессов перемещения товаров, платежных сервисов, систем хранения больших массивов данных подошло к качественно новому рубежу практического применения – созданию систем прослеживаемости товаров на национальном и международном уровне, решающих широкий спектр задач в интересах частных лиц и государственных органов.

В Республике Беларусь как на уровне бизнеса, так и на уровне государства уже существуют компоненты идентификации, маркировки и прослеживаемости товаров, отвечающие международным и национальным стандартам, развивается соответствующая нормативно-правовая и нормативно-техническая база [1].

Достижения научно-технического прогресса, в том числе в сфере информационных и цифровых технологий, позволяют внедрять и использовать новые правовые средства воздействия на отдельные элементы экономических отношений. Так, возможность цифрового кодирования товаров, позволяющая идентифицировать их с любой степенью индивидуальной определенности, допускает установление дополнительного контроля за произ-

водителем и/или продавцом товара, его качеством, оборотом и тем самым способствует противодействию присутствия на внутреннем рынке фальсифицированной и контрафактной продукции [2].

Поскольку посредством маркировки отдельных товаров средствами идентификации возможно обеспечивать не только контроль оборота товаров на внутреннем рынке, но легальность импорта, государствами-членами Евразийского экономического союза (ЕАЭС) принят ряд документов, касающихся формирования системы маркировки отдельных видов продукции на территории Единого экономического пространства (например, Решение Совета Евразийской экономической комиссии № 28 от 28 апреля 2014 г. «О подходах по формированию и применению на единой таможенной территории системы маркировки отдельных видов продукции легкой промышленности», Соглашение о маркировке товаров средствами идентификации в Евразийском экономическом союзе от 2 февраля 2018 г.).

Внедрение системы прослеживаемости товаров в ЕАЭС призвано решить важнейшую задачу обеспечения законности оборота товаров как на территории государств – членов ЕАЭС, так и при трансграничном перемещении. Создание системы прослеживаемости товаров в ЕАЭС осуществляется

не только путем выработки общих подходов к перечню товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации, но прежде всего путем поэтапного формирования национальных систем прослеживаемости [3].

Одним из эффективных инструментов обеспечения прослеживаемости является цифровая маркировка. Она представляет собой систему идентификации продукции с помощью уникальных цифровых кодов, содержащих информацию о товаре, его производителе, дате производства, сроке годности, партии, логистических операциях и других характеристиках. Цифровая маркировка позволяет автоматизировать процесс отслеживания продукции на всех этапах цепочки поставок, что значительно повышает эффективность контроля качества и безопасности товаров [4].

В целях обеспечения законного оборота товаров, защиты прав потребителей, совершенствования правового регулирования механизма маркировки товаров Указом Президента Республики Беларусь от 10 июня 2011 г. №243 «О маркировке товаров» [5] создана государственная информационная система маркировки товаров.

Требования к формированию средств идентификации определяются НПА, в частности, согласно инструкции об обороте средств идентификации, утвержденной постановлением Министерства по налогам и сборам Республики Беларусь от 03.05.2021 № 17, нанесение средств идентификации должно осуществляться в соответствии с международными стандартами: ISO/IEC 15415:2024 «Методы автоматической идентификации и сбора данных. Технические требования к испытаниям качества печати символа штрихового кода. Двумерные обозначения» и ISO/IEC 16022:2024 «Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Data Matrix bar code symbology specification».

Маркировка товаров (продукции) средствами идентификации предоставляет возможность организовать эффективный контроль за происхождением товаров в любой из точек, начиная упаковочной линией и заканчивая складом магазина.

Основные преимущества технологий автоматизированной идентификации:

- совершенствование учета, создание единой системы учета и контроля за движением изделий и комплектующих частей на каждом участке, а также за состоянием логистического процесса на предприятии в целом;

- облегчение процесса подготовки и обработки заказов;

- устранение ошибок при транспортировке;

- сокращение времени хранения запасов;

- сокращение трудовых затрат, сокращение численности вспомогательного персонала и отчетной документации, исключение ошибок [4].

Таким образом, можно выделить основные преимущества идентификации и маркировки товаров (продукции) для цепочек поставок:

1. Точность в идентификации объектов. Средства идентификации позволяют быстро, просто, и самое главное, точно считывать и передавать информацию о тех предметах, которые нуждаются в контроле.

2. Средство идентификации позволяет значительно повысить уровень информированности любого специалиста, задействованного в цепочках: производитель – хранение – доставка – потребитель.

3. Точный учет складироваемых или проданных товаров.

4. Более экономичное использование рабочего времени. Средство идентификации позволяет автоматизировать процесс сбора информации и ее последующий анализ, что полностью исключает применение ручного труда.

5. Увеличение скорости получения и обработки информации. Соответственно позволит сократить время на обслуживание клиентов или на формирование заказов и их доставку.

6. Сокращение ошибок при автоматической идентификации объектов по сравнению с ручной. Маркировки товаров (продукции) средствами идентификации позволяют полностью исключить влияние человеческого фактора на правильную идентификацию объектов, проведение инвентаризаций, проведение торговых или иных операций с товаром [1].

Литература

1. Методы и технологии идентификации и маркировки товаров: монография / В. И. Дравица [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 223 с.
2. Сморгачева, Л. Н. Обязательная маркировка товаров средствами идентификации как инструмент административно-правового воздействия на экономические отношения / Л. Н. Сморгачева // Вестник Южно-Уральского гос. университета. Серия «Право». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 44–50.
3. Андреева, Л. В. Создание системы прослеживаемости товаров в Евразийском экономическом союзе: цели, перспективы, организационно-правовая основа / Л. В. Андреева // Международное сотрудничество Евразийских государств: политика, экономика, право. – 2018. – № 2. – С. 70–78.
4. Цифровизация маркировки потребительских товаров / О. А. Голубенко [и др.] // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2020. – № 3(82). – С. 8–11.
5. О маркировке товаров: Указ Президента Респ. Беларусь от 10.06.2011 № 243 – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P31100243>.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА АГОРИТМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОТНОШЕНИИ
ПРИОРИТИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ

Гуринович А. А., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В докладе рассмотрена задача формирования эффективной системы поддержки принятия решений проектных организаций. Особое внимание уделено алгоритму выбора приоритетов перераспределения ресурсов между параллельными проектами в часто встречающихся форс-мажорных ситуациях. Рассмотрены все возможные варианты.

Ключевые слова: система и алгоритм поддержки принятия решений.

DEVELOPING A DECISION-MAKING FRAMEWORK
FOR PROJECT PRIORITIZATION

Hurynovich A. A., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This report examines the challenge of developing an effective decision support system for project organizations. Particular attention is paid to the algorithm for prioritizing resource redistribution between parallel projects in frequently encountered force majeure situations. All possible options are considered.

Keywords: decision support system, project implementation risks, decision support algorithm.

*Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by*

В связи с наступлением промышленной революции «Индустрия 4.0» количество проектно-ориентированных организаций непрерывно растет. Система поддержки принятия решений (СППР) в рамках менеджмента таких организаций требует особого подхода [1, 2].

Установлено, что в области менеджмента этот этап формирования эффективной СППР не имеет существенной научной и методической проработки. Принятие управленческих решений сегодня – это скорее искусство, в основном определяемое личностью руководителя, нежели системно организованная повседневная работа менеджера/координатора проекта. Поэтому разработка корректной модели СППР является необходимым условием не только результативного и эффективного функционирования системы управления, но и всего цикла организационно-технических мероприятий в процессе ее дальнейшего совершенствования [3].

В докладе рассмотрено решение задачи построения алгоритма поддержки принятия решений на основании анализа типовых источников дестабилизации деятельности проектной организации, приводящих к срыву первоначально плана выполнения проектов, и, следовательно, дальнейшего их наложения друг на друга по части ресурсов (временных, денежных, персонал, оборудование).

При наличии полной информации о важности того или иного проекта, задача решается сама собой. Однако, в форс-мажорных ситуациях координатор проектов будет вынужден принимать решение на основании неполного массива информации, что естественно вызывает риск принятия некорректных решений. Следовательно, мы сталкиваемся с необходимостью разработки механизма принятия решений в отношении выделения ресурсов тому или иному проекту в случае их наложения.

На этапе решения задачи выбора способа принятия решения в отношении накладывающихся

проектов нами было рассмотрено полное множество возможных ситуаций, когда координатор проекта становится перед выбором какому проекту отдать предпочтение (с минимальными потерями в отношении ресурсов), мы определили три возможных способа действий:

А) Выбор альтернативного варианта: Проект 1 или Проект 2;

Б) Раздробить проекты и перераспределить с учетом оптимизации;

В) Привлечь дополнительные ресурсы.

Право выбора способа остается за координатором или другим лицом, принимающим решение. Рассмотрим подробнее способ «Б».

Задача разработки механизма оптимизации: раздробить проекты на более мелкие элементы (этапы/процессы) и перераспределить последовательность их выполнения с учетом оптимизации по ресурсам. В данном способе можно выделить три условия.

Условие 1.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны и не похожи между собой, но имеется возможность поменять последовательность выполнения, ресурсы одни и те же (рисунок 1).

Задача: поменять последовательность выполнения этапов проекта таким способом, чтобы они не накладывались один на другой по части ресурсов.

Решение: для данного случая нет типового решения, в каждой ситуации решение принимается на месте.

Результат: скорректированный план-график выполнения параллельных проектов за счет изменения последовательности выполнения их этапов.

Условие 2.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны, но похожи между собой

(полностью или частично), ресурсы одни и те же (рисунок 2).

Задача: поменять последовательность выполнения этапов проектов таким способом, чтобы одновременно выполнялись схожие этапы (целиком или их части).

Решение: для данного случая нет типового решения, в каждой ситуации решение принимается на месте.

Результат: скорректированный план-график выполнения параллельных проектов за счет совмещения похожих этапов.

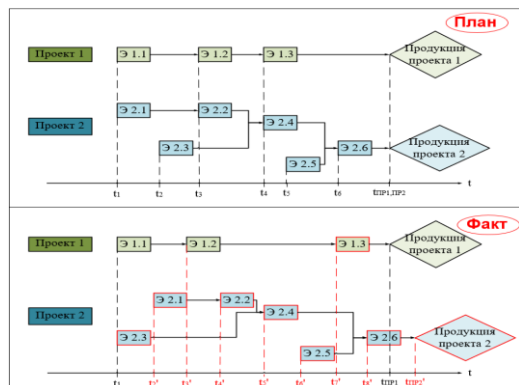


Рисунок 1 – Изменение последовательности выполнения этапов проектов

Условие 3.

Исходные данные: этапы выполнения Проекта 1 и Проекта 2 параллельны и не похожи между собой, при этом нет возможности менять последовательность выполнения этапов. Ресурсы одни и те же.

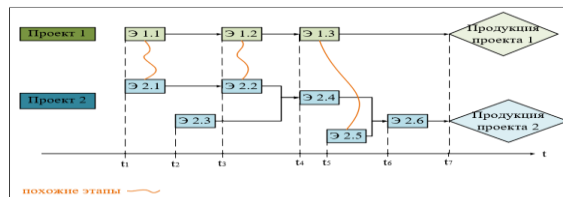


Рисунок 2 – Одновременное выполнение похожих этапов разных проектов

Решение/результат: нет. Выбираем способ А или способ Б.

Методологическая ценность предложенного решения данной проблемы заключается в универсальности данной концепции системы поддержки принятия решений для организации любого профиля и размеров сложных проектов.

Литература

1. Гуринович, А. А. Коммуникации как эффективный инструмент функционирования СМК / А. А. Гуринович, П. С. Серенков, Е. А. Давыдова // Материалы 17-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Мн.: БНТУ, 2024. – С. 254.
2. Гуринович, А. А. Особенности организационной структуры СМК для проектных организаций / А. А. Гуринович, П. С. Серенков, Е. А. Давыдова // Приборостроение-2024: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, нояб. 2024 г. – Мн.: БНТУ, 2024. – С. 112–113.
3. Серенков, П. С. Методологические основы создания систем менеджмента качества с использованием подходов организационного проектирования сложных систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.23 / П. С. Серенков. – Минск, 2007. – 50 с.

УДК 351.824

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Давыдова Е. А., Фильченко Н. Т.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Пищевая промышленность является одной из ключевых отраслей экономики страны, непосредственно влияющей на здоровье и благополучие населения. В условиях глобализации рынков и усложнения производственных цепочек традиционные методы государственного надзора и контроля за безопасностью пищевой продукции сталкиваются с новыми вызовами. Цифровизация надзорной деятельности становится не просто трендом, а объективной необходимостью для обеспечения эффективного, прозрачного и превентивного контроля. Данный доклад посвящен анализу основных направлений, преимуществ и вызовов внедрения цифровых технологий в надзорную деятельность в пищевой промышленности.

Ключевые слова: цифровизация, качество и безопасность, цифровая трансформация, риск-ориентированное планирование проверок, чек-листы, система прослеживания, дистанционный надзор

DIGITAL TRANSFORMATION OF SUPERVISORY ACTIVITIES IN THE FOOD INDUSTRY

Davidova E. A., Filchenco N. T.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The food industry is one of the key sectors of the country's economy, directly affecting the health and well-being of the population. In the context of globalization of markets and the complexity of production chains, traditional methods of state supervision and control over food safety are facing new challenges. Digitalization of supervisory activities is becoming not just a trend, but an objective necessity for ensuring effective, transparent, and preventive control. This report focuses on analyzing the main areas, advantages, and challenges of implementing digital technologies in supervisory activities in the food industry.

Keywords: digitalization, quality and safety, digital transformation, risk-based inspection planning, checklists, traceability, remote inspection.

Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by

В условиях глобализации рынков и усложнения производственных цепочек традиционные методы государственного надзора и контроля за безопасностью пищевой продукции сталкиваются с новыми вызовами. Цифровизация надзорной деятельности становится не просто трендом, а объективной необходимостью для обеспечения эффективного, прозрачного и превентивного контроля. Данный доклад посвящен анализу основных направлений, преимуществ и вызовов внедрения цифровых технологий в надзорную деятельность в пищевой промышленности.

1. Основные направления цифровизации надзорной деятельности:

Цифровая трансформация надзора затрагивает все этапы – от планирования проверок до работы с результатами.

1.1. Риск-ориентированное планирование проверок. Вместо плановых проверок «по графику» используется анализ больших данных (Big Data). Цифровые системы агрегируют информацию из множества источников: данные предыдущих проверок, жалобы потребителей (в том числе из социальных сетей), информация о качестве продукции из лабораторий, данные о происхождении сырья. Алгоритмы машинного обучения анализируют эти массивы и выявляют предприятия с наибольшими рисками, формируя адресный план проверок. Это позволит сосредоточить ресурсы на самых проблемных объектах.

1.2. Электронные проверочные листы (чек-листы) и мобильные рабочие места инспектора. Инспекторы используют планшеты или смартфоны со специализированным программным обеспечением. Все данные вносятся непосредственно в цифровые чек-листы, которые исключают субъективность и человеческий фактор при заполнении. Результаты проверки, фото- и видеофиксация нарушений мгновенно загружаются в единую базу данных, что минимизирует риски подтасовок и потери информации.

1.3. Системы прослеживаемости (Traceability). Ключевой элемент цифровизации – сквозное отслеживание пути пищевого продукта «от поля до прилавка». С помощью технологий блокчейн, QR-кодов и RFID-меток создается неизменяемая цифровая цепочка данных о происхождении сырья, этапах переработки, транспортировки и хранения. При выявлении небезопасной продукции надзорные органы могут в режиме реального времени установить ее источник и точку распространения, чтобы быстро и точно изъять ее из оборота, а не блокировать целые предприятия.

1.4. Дистанционный надзор (Remote Inspection). Использование технологий видеоконференц-связи, потоковой передачи данных

с камер на производстве, предоставление предприятием доступа к своим системам электронного документооборота (например, к журналам производственного контроля, данным с датчиков температуры в холодильниках, складах сырья и готовой продукции). Это позволит проводить часть контрольных мероприятий без выезда на объект, экономя время и ресурсы, а также снижая коррупционные риски.

1.5. Предикативная аналитика и «системы раннего предупреждения». На основе постоянного мониторинга данных системы искусственного интеллекта могут прогнозировать потенциальные нарушения или вспышки заболеваний. Например, анализируя отклонения температурного режима при транспортировке скоропортящихся товаров или рост негативных отзывов о продукте в определенном регионе, система может автоматически сигнализировать инспектору о необходимости внепланового контроля.

2. Преимущества цифровизации надзора:

Повышение эффективности: сокращение времени на проведение проверок и администрирование за счет автоматизации.

Увеличение прозрачности: все действия инспектора и результаты фиксируются в системе, что снижает коррупционные риски и повышает доверие бизнеса и потребителей.

Рост объективности: решения принимаются на основе анализа данных, а не субъективного мнения.

Оперативность реагирования: возможность мгновенно выявлять и локализовывать источники опасной продукции, защищая рынок страны от некачественной, опасной продукции.

Снижение административной нагрузки на бизнес: возможность предоставлять документы в электронном виде, сокращение количества плановых проверок за счет риск-ориентированного подхода.

3. Проблемы и вызовы внедрения.

Несмотря на очевидные преимущества, процесс цифровизации сталкивается с рядом трудностей:

высокая стоимость: создание и внедрение масштабных ИТ-систем требует значительных финансовых вложений;

необходимость обеспечения кибербезопасности: централизованные базы данных становятся лакомой целью для хакеров, что требует надежных систем защиты;

проблема цифрового неравенства: не все предприятия, особенно малый бизнес, технически готовы к интеграции с цифровыми системами надзорных органов;

нехватка кадровых компетенций: требуется переподготовка сотрудников надзорных органов, которые должны стать не только специалистами в области пищевой безопасности, но и уверенными пользователями сложных digital-инструментов;

вопросы законодательного регулирования: необходимость закрепления юридической силы за электронными документами и цифровыми подписями.

Рассмотрев основные преимущества и недостатки внедрения цифровых технологий в надзорную деятельность страны, в заключение можно сделать следующий вывод:

цифровизация надзорной деятельности в пищевой промышленности – это неизбежный и необходимый шаг к созданию современной, эффективной и прозрачной системы обеспечения безопасности пищевой продукции. Она трансформирует надзор из карательного и реактивного в инструмент превентивного управления рисками, основанного на данных. Успех этой трансформации зависит от комплексного подхода, включающего не только внедрение технологий,

но и адаптацию законодательной базы, инвестиции в инфраструктуру и масштабную переподготовку кадров. В конечном итоге, это инвестиции в здоровье нации, защите рынка страны от опасной продукции и устойчивое развитие пищевой промышленности страны.

Литература

1. Краснов, А. В. Электронные чек-листы как инструмент цифровизации аудитов качества / А. В. Краснов, Е. П. Семенова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2019. – № 2. – С. 45–58.

3. Основные направления развития системы прослеживаемости товаров в качестве фактора обеспечения безопасности России в условиях расширения процесса глобализации // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 1. – URL: <https://esj.today/issue-1-2020>.

УДК 658.562

РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ И ИСПЫТАНИЯМ ДЫМОВЫХ ТРУБ НА КЛАСС ПО ДАВЛЕНИЮ И АККРЕДИТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Дербенев В. В., Соломахо В. Л.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данном тезисе рассматриваются пути решения, которые могут быть использованы на повышение уровня пожарной и экологической безопасности, снижения рисков здоровья и безопасности граждан, обеспечение доверия заявителей на проведение испытаний, работ и услуг к деятельности аккредитованных субъектов.

Ключевые слова: безопасность, испытания, контроль, дымовые трубы, давление, норматив, обязательность, аккредитация.

DEVELOPMENT OF WAYS TO IMPROVE MONITORING AND TESTING CHIMNEYS FOR PRESSURE CLASSIFICATION AND ACCREDITATION TESTING LABORATORIES

Derbenev V. V., Solomakho V. L.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This thesis examines solutions that can be used to improve fire and environmental safety, reduce risks to public health and safety, and ensure the confidence of applicants for testing, work, and services in the activities of accredited entities.

Keywords: safety, testing, monitoring, chimneys, pressure, standard, mandatory, accreditation.

*Адрес для переписки: Соломахо В. Л., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: solomaho@bntu.by*

Проблематика.

1. При строительстве зданий и сооружений, в которых применяется газовое оборудование для целей, отопления и горячего водоснабжения применяются дымовые трубы, которые имеют существенное влияние на экологию и безопасность граждан в процессе эксплуатации. Дымовые трубы классифицируются по классам от А до D – в зависимости от важности и сложности помещений. Классификация данных труб приведена СТБ 2522-2018 таблице 2.

Испытания проводятся с применением дифманометра и двух камер отрицательного и положительного давления (с применением диафрагмы ДКС). Периодичность испытаний не установлена. Испытание проводится при капитальном ремонте,

модернизации и вновь вводимых объектах в эксплуатации. Для проведения испытаний установлены требования к обязательной аккредитации в соответствии с п. 4.5 СТБ 2039-2010.

В настоящее время в ряде регионов Республики Беларусь (например, в г. Минске, г. Гродно, г. Брест) контроль и проведение испытаний на класс по давлению дымовых труб, после монтажа (в соответствии с п. 8.8 СТБ 2039-2010) является обязательным требованием, со стороны контролирующих органов. Такой подход направлен на повышение уровня пожарной и экологической безопасности, предупреждение аварийных ситуаций, связанных с утечкой продуктов сгорания, а также обеспечение соответствия строительных объектов современным нормам.

2. В регионах (например, в Могилевской области) практика основана преимущественно на локальных нормативных документах. При этом в указанных документах отсутствует требование обязательных испытаний на класс по давлению дымовых труб, что на практике снижает уровень контроля и создает потенциальные риски для здоровья и безопасности граждан.

3. Игнорирование требований к дымовым трубам со стороны участников строительного процесса, в том числе при приемке объектов в эксплуатацию.

Пути совершенствования: внесения предложений для внесения изменений в действующие нормативно-правовые акты, регулирующие вопросы эксплуатации и приемки дымовых труб, с целью установления обязательности проведения испытаний на класс по давлению, а также, при необходимости, подготовки предложений по корректировке республиканских нормативных актов в данной сфере; инициировать комплексные (обновленные) проверки объектов введенных в эксплуатацию с 2022 года, с приоритетным вниманием к зданиям с массовым пребыванием людей (детские сады и школы, больницы), включая обязательные испытания дымовых труб на класс по давлению, при необходимости присутствием инспекторов Департамента контроля и надзора за строительством (Госстройнадзора), для фиксации (возможных) нарушений; обеспечить незамедлительное информирование приемочных комиссий

о необходимости строгого соблюдения требований СТБ 2039-2010 и Кодекса Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности при приемке объектов, исключая любые послабления.

Литература

1. СТБ 2039-2010. Строительство. Монтаж систем внутреннего газоснабжения зданий и сооружений. Контроль качества работ. – Введ. 01.01.2021. – Мн.: БелГИСС, 2010. – 32 с.
2. СТБ EN 1856-1-2013. Трубы дымовые. Требования к металлическим дымовым трубам. Часть 1. Детали дымоотрубной системы. – Введ. 01.01.2024. – Мн.: БелГИСС, 2013. – 48 с.
3. СТБ EN 1859-2012. Трубы дымовые. Металлические дымовые трубы. Методы испытаний. – Введ. 01.01.2013. – Мн.: БелГИСС, 2012. – 36 с.
4. СТБ 1915-2020. Воздуховоды металлические вентиляционные. Технические условия. – Введ. 01.01.2020. – Мн.: БелГИСС, 2020. – 24 с.
5. Об оценке соответствия техническим требованиям и аккредитации органов по оценке соответствия: Закон Респ. Беларусь от 24.10.2016 № 437-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11600437> (дата обращения: 20.02.2025).
6. СТБ 2522-2019 (EN 12237:2003). Вентиляция в зданиях. Система воздуховодов. Прочность и герметичность воздуховодов из тонколистового металла круглого поперечного сечения. – Введ. 01.01.2019. – Мн.: БелГИСС, 2019. – 28 с.

УДК 621.31/.36

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Дубейко С. В., Коробко Ю. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрена методика калибровки трехосного акселерометра модели 356A02 ICP® Triaxial Accelerometer производства PCB Piezotronics с помощью которого осуществляется измерение ускорения. Кратко были представлены все разделы методики калибровки.

Ключевые слова: акселерометр, методика калибровки, погрешность акселерометра, измерение ускорения, виброустановка.

ACCELEROMETER CALIBRATION TECHNIQUE

Dubeyko S. V., Korobko Yu. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The calibration method of the 356A02 ICP® Triaxial Accelerometer manufactured by PCB Piezotronics is considered, which is used to measure acceleration. All sections of the calibration method were briefly presented.

Keywords: accelerometer, calibration method, accelerometer error, acceleration measurement, vibration installation.

Адрес для переписки: Коробко Ю. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Требования к порядку организации и осуществлению калибровки средств измерений, применяемых при измерениях в сфере законодательной метрологии и используемых в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах) в Республике Беларусь устанавливаются в [1].

Предлагаемая статья посвящена актуальному вопросу – разработке методики калибровки трехосного акселерометра модели 356A02 ICP® Triaxial Accelerometer производства PCB

Piezotronics с помощью которого осуществляется измерение ускорения. Данный акселерометр используется в испытательном модуле, предназначенном для испытаний спортивных и игровых площадок на требования безопасности применения. Согласно НДТ [2] основное требование, предъявляемое к акселерометрам, является обеспечение погрешности измерения ускорения (амплитуды) не более 5 %. При этом измерение

амплитуды должно осуществляться в рабочем диапазоне частот от 20 Гц до 1000 Гц.

Проведенные работы позволили определить структуру методики калибровки, которая включает в себя следующие разделы: структура, вводная часть, операции калибровки, средства калибровки, требования безопасности, условия калибровки, подготовка к калибровке, проведение калибровки, обработка результатов измерений, оформление результатов калибровки.

В соответствии с рекомендациями во вводной части методики калибровки устанавливаются назначение и область распространения документа. При этом предлагается изложить данный раздел в следующей редакции: «Настоящий документ распространяется на испытательный модуль со встроенным акселерометром модели 356A2. Модуль предназначен для измерения и преобразования ускорения контролируемого объекта в пропорциональный электрический сигнал, и устанавливает программу и методику проведения калибровки. Данные средства измерения при ударном воздействии воспроизводят электрический сигнал, пропорциональный значению ускорения. Их принцип действия основан на преобразовании механических колебаний в электрический сигнал, пропорционально ускорению контролируемого объекта. Встроенный в модуль электронный блок осуществляет регистрацию изменений напряжения, вычисление на основе зарегистрированных значений пиковой величины ускорения, угла удара, скорости в момент удара, коэффициента НДС. Информация о вычисленных величинах отражается на дисплее беспроводного блока управления».

Раздел «Операции калибровки» содержит перечень операций, проводимых при калибровке, указанных в определенной последовательности. В процессе выполнения калибровки испытательного модуля со встроенным акселерометром, ICP®, выполняются следующие операции: внешний осмотр и проверка комплектности, опробование, определение метрологических характеристик, определение погрешности измерения ускорения (амплитуды).

В разделе «Средства калибровки» рекомендуется приводить перечень эталонов, эталонных средств измерений и других технических средств с указанием их метрологических характеристик и (или) обозначений, распространяющихся на них стандартов, регламентирующих технические требования к ним. Для определения метрологических характеристик испытательного модуля со встроенным акселерометром, используется виброустановка МРА403–M124M. Кроме того, для определения величин, характеризующих условия выполнения измерений, используются прибор измерительный ПИ–002/1 и барометр-анероид БАММ–1.

В разделе «Требования безопасности» приводятся требования, обеспечивающие безопасность проведения калибровки: безопасность труда, производственная санитария, охрана окружающей

среды и т. п. Раздел предлагается изложить в следующей редакции: «При проведении калибровки должны быть соблюдены требования безопасности, предусмотренные [3–5], а также соответствующие рекомендациям, изложенным в техническом описании на средства измерений и другие технические средства, требования инструкций по охране труда для сотрудников лаборатории, в которой проводится калибровка и инструкции по пожарной безопасности».

Раздел «Условия калибровки» может содержать перечень физических величин, влияющих на метрологические характеристики калибруемых средств измерений, с указанием номинальных значений и пределов допускаемых при калибровке отклонений от номинальных значений. Согласно данным рекомендациям, а также в соответствии с [6] в этом разделе методики калибровки приводится следующая информация: «Калибровка средства измерения должна проводиться при следующих условиях: температура окружающей среды от 18 °С до 25 °С; влажность воздуха от 40 % до 80 %; атмосферное давление (от 97 кПа до 105 кПа)».

Раздел «Подготовка к калибровке» может содержать перечень подготовительных работ, которые производят перед калибровкой и способы их выполнения. Перед проведением процедуры калибровки испытательного модуля со встроенным акселерометром, необходимо выполнить подготовительные работы, отраженные в данном разделе методики, которые включают: проверку наличия технического описания СИ (документации по эксплуатации СИ); подготовку к работе СИ, эталонов и других технических средств согласно требованиям их технической или эксплуатационной документации; определение действительных значений температуры, влажности и атмосферного давления и сравнение их с допустимыми.

Раздел «Проведение калибровки» содержит следующие подразделы: внешний осмотр, опробование, определение метрологических характеристик. При внешнем осмотре приводят перечень требований, которым должно удовлетворять калибруемое СИ в отношении внешнего вида и проверяют: соответствие комплектности измерительных устройств требованиям сопроводительной документации; отсутствие внешних повреждений, влияющие на работоспособность преобразователя; соответствие маркировки измерительных устройств требованиям сопроводительной документации; целостность органов управления и дисплея. Опробование проводится в соответствии с эксплуатационной документацией на СИ и включает перечень и описание операций, которые необходимо провести с использованием или без использования средств калибровки для проверки работоспособности калибруемого средства измерения или действия, или взаимодействия его отдельных узлов и элементов. При опробовании проверяют работоспособность СИ; работоспособность ручного блока управления. Определение

метрологических характеристик включает перечень операций по определению метрологических характеристик калибруемого СИ. Погрешность акселерометра определяют при близких к постоянным значениям ускорения, воспроизводимых образцовой виброустановкой, не менее чем при 10 значениях частоты, находящихся в пределах рабочего диапазона частот акселерометра или в непрерывном спектре частот. При этом погрешность акселерометра Δf в рабочем диапазоне частот (в процентах) определяют, как:

$$\Delta_f = \frac{\alpha_n - \alpha_g}{\alpha_g} \cdot 100, \quad (1)$$

где α_g – значение параметра вибрации, воспроизводимое образцовой виброустановкой; α_n – соответствующее показание акселерометра.

В разделе «Оформление результатов калибровки» приводятся требования к оформлению результатов калибровки. В методике калибровки установлено, что по результатам калибровки оформляется протокол. При положительных результатах на СИ наносят знак калибровки и (или) выдают свидетельство о поверке. При отрицательных результатах калибровки акселерометра ранее нанесенный знак калибровки подлежит уничтожению, предыдущее свидетельство прекращает свое

действие, и выписывается заключение о непригодности. Акселерометр к применению не допускается.

Литература

1. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений: постановление Госстандарта Респ. Беларусь от 23.04.2021 № 42 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100042> (дата обращения: 20.12.2025).
2. ГОСТ 34615-2019 (EN 1177:2018+AC:2019). Покрытия ударопоглощающие игровых площадок. Определение критической высоты падения. – Введ. 01.01.2020. – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.
3. ТКП 181-2023. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Введ. 01.01.2024. – Минск: БелГИСС, 2023. – 184 с.
4. ТКП 427-2022. Электроустановки. Правила по обеспечению безопасности при эксплуатации. – Введ. 01.01.2023. – Мн.: БелГИСС, 2022. – 96 с.
5. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. – Введ. 01.01.1976. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 16 с.
6. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 01.01.1985. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 24 с.

УДК 621.31/36

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА TRIAX

Дубейко С. В., Коробко Ю. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрена методика оценивания неопределенности калибровки акселерометра. Выявлены источники неопределенности, построена причинно-следственная диаграмма (диаграмма К. Исикавы). Представлен расчет расширенной неопределенности калибровки акселерометра TRIAX и бюджет неопределенности.

Ключевые слова: неопределенность, акселерометр, калибровка, ч, причинно-следственная диаграмма, измерение, источник неопределенности.

TRIAX ACCELEROMETER CALIBRATION UNCERTAINTY

Dubeyko S. V., Korobko Yu. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The method of estimating the uncertainty of the accelerometer calibration is considered. The sources of uncertainty are identified, and a cause-and-effect diagram (K. Ishikawa diagram) is constructed. The calculation of the extended uncertainty of the TRIAX accelerometer calibration and the uncertainty budget are presented.

Keywords: uncertainty, accelerometer, calibration, h, cause-and-effect diagram, measurement, source of uncertainty.

Адрес для переписки: Коробко Ю. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Одной из важнейших функций любого государства является обеспечение безопасности его граждан, включающей, прежде всего, безопасность окружающей среды: транспорта, быта, спорта и т. п. Особенно остро стоит вопрос безопасности детей, поскольку дети находятся в стадии активного роста и развития, и их организмы еще не полностью сформированы и не имеют достаточной стойкости к воздействию различных факторов. Дети чаще подвержены болезням и негативному воздействию окружающей среды.

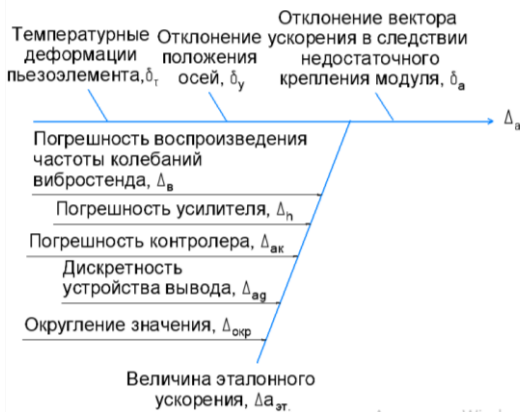
Предлагаемая статья посвящена актуальному вопросу – обеспечению безопасности детей, находящихся на спортивных и игровых площадках во время проведения игр, спортивных мероприятиях и т. п. [1]. Основным направлением работы являются вопросы исследования различного рода покрытий игровых и спортивных площадок с целью определения их безопасности на ударное воздействие (прежде всего головы) и возможности их применения [2–3]. В результате разработана оригинальная методика испытаний указанных

покрытий на удар. Для определения силы удара использовалось испытательное оборудование фирмы TRIAX и акселерометр модели 356A02. Методика испытаний предполагает необходимость проведения калибровки акселерометра, что, в свою очередь, требует демонстрации ее точности. В связи с этим была разработана оригинальная методика оценивания неопределенности калибровки акселерометра.

Сущность методики заключается в определении погрешности измерения ускорения акселерометра Δ_a как отклонение действительного измеренного значения $\Delta_{изм}$ от эталонного $\Delta_{эт}$ полученного с помощью виброустановки, используемой при калибровке (1):

$$\Delta_a = |\Delta_{эт} - \Delta_{изм}|. \quad (1)$$

Для выявления источников неопределенности использовался метод «мозгового штурма» с привлечением 3-х экспертов лаборатории. Их структуризация показана причинно-следственной диаграммой (диаграммой К. Исикавы), рисунок 1:



δ_τ – температурные деформации пьезоэлемента; δ_γ – отклонение положения осей; δ_α – отклонение вектора ускорения вследствие недостаточного крепления модуля; Δ_v – погрешность воспроизведения амплитуды/частоты колебаний вибростенда

Рисунок 1 – Источники возникновения неопределенности при измерении ускорения при калибровке

Исходя из этого полная математическая модель измерения при калибровке представляется как (2):

$$\Delta_a = \Delta_{откл} + \delta_\tau + \delta_\gamma + \delta_\alpha + \Delta_v + \Delta_h + \Delta_{ак} + \Delta_{аг} + \Delta_{окр}, \quad (2)$$

где $\Delta_{откл} = |\Delta_{эт} - \Delta_{изм}|$, δ_τ – поправка на температурную деформацию пьезоэлемента, δ_γ – поправка на отклонение положения осей, δ_α – поправка на отклонение вектора ускорения вследствие недостаточного крепления модуля, Δ_v – поправка на погрешность воспроизведения частоты колебания вибростенда, Δ_h – поправка на погрешность усилителя, $\Delta_{ак}$ – поправка на погрешность контролера, $\Delta_{аг}$ – поправка на дискретность устройства вывода, $\Delta_{окр}$ – поправка на округление значения.

Анализ источников возникновения неопределенности показывает, что температурные деформации пьезоэлемента, отклонение положения осей, отклонение вектора ускорения вследствие недостаточного крепления модуля не оказывают существенного влияния на неопределенность измерения и их влиянием можно пренебречь.

Поскольку в эксплуатационной документации не установлен закон распределения для влияющих величин Δ_v , Δ_h и $\Delta_{ак}$, то для них принимаем равномерный (прямоугольный) закон распределения, а вызванные ими неопределенности рассчитываются по типу В (3):

$$u(\Delta_v) = \frac{\Delta_v}{\sqrt{3}}, u(\Delta_h) = \frac{\Delta_h}{\sqrt{3}}, u(\Delta_{ак}) = \frac{\Delta_{ак}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Поскольку вывод на экран значения ускорения вибростенда осуществляется до 0,1 знака после запятой, то погрешность $\Delta_{аг}$ будет соответствовать значению наименьшего разряда кода. Измеренное ускорение может принять любое значение. Принимается нормальный закон распределения для данной величины, поскольку неопределенность, связанная с дискретностью устройства, имеет много больше двух составляющих. Составляющая неопределенности, связанная с дискретностью устройства будет определяться как (4):

$$u(\Delta_{ад}) = \frac{\frac{1}{2} \text{наим.разряд кода}}{2\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Округление результата единичного определения ускорения осуществляется до 1,0 м/с². Соответственно предельное отличие округленного результата от определенного значения составит 0,5 м/с². Принимаем нормальный закон распределения для данной величины, поскольку неопределенность оценивания ускорения имеет больше двух составляющих, причем среди составляющих нет доминирующей по значению. Неопределенность, обусловленная округлением единичного значения, будет определяться как (5):

$$u(\Delta_{окр}) = \frac{0,5}{2\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Все входные величины рассматриваются как некоррелированные, поскольку получены независимо друг от друга на разных этапах методики калибровки и относятся к разным источникам, которые не связаны между собой. Коэффициенты влияния $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 1$.

Суммарная стандартная неопределенность величины измерения ускорения определяется как (6):

$$u(\Delta_a) = \sqrt{(C_1 \cdot u(\Delta_v))^2 + (C_2 \cdot u(\Delta_h))^2 + (C_3 \cdot u(\Delta_{ак}))^2 + (C_4 \cdot u(\Delta_{ад}))^2 + (C_5 \cdot u(\Delta_{окр}))^2} \quad (6)$$

Бюджет неопределенности, составленный для конкретных значений погрешностей, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Пара-метр	Значение параметра	Стандартная неопределенность, $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности, C_i	Вклад в неопределенность, $C_i \cdot u(x_i)$
Δ_v	0,05	0,03	1	0,03
Δ_h	0,01	0,006	1	0,006
$\Delta_{ак}$	0,5	0,005	1	0,005
$\Delta_{ад}$	0,05	0,00014	1	0,00014
$\Delta_{окр}$	0,5	0,0014	1	0,0014
Δ_a	$\Delta_a = a_{эп} - a_{изм} $	0,03	–	–

Оценка расширенной неопределенности получается при уровне доверия 95 % в предположении нормального закона распределения оцениваемой

величины. Коэффициент охвата k принимается равным 2 (7):

$$U(\Delta a) = u(\Delta a) \cdot k, \quad (7)$$

Литература

1. Perceived links between playing surfaces and injury: a worldwide study of elite association football players / A. C. Mears [et al.] // Sports Medicine. – 2018. – Vol. 4. – Art. 40.
2. Association of artificial turf and concussion in competitive contact sports: a systematic review and meta-analysis / F. O'Leary [et al.] // BMJ Open Sport & Exercise Medicine. – 2020. – Vol. 6, № 1. – Art. e000695.
3. Meyers, M. C. Incidence, mechanisms, and severity of game-related college football injuries on FieldTurf versus natural grass: a 3-year prospective study / M. C. Meyers // The American J. of Sports Medicine. – 2010. – № 4. – P. 687–697.

УДК 65.012.61

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ РИСКА ПРОЦЕССА ИНСПЕКЦИИ В ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ

Качанова Ю. И., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В надзорной деятельности пищевой продукции критически важно правильно идентифицировать и оценивать риски, чтобы минимизировать вероятность некорректных решений. В условиях усиления требований к безопасности пищевой продукции и ограниченности ресурсов надзорных органов актуальной становится задача повышения эффективности надзорной деятельности. Одним из ключевых инструментов в этом направлении является идентификация факторов риска, возникающих в процессе проведения надзорных мероприятий. В докладе рассматривается функциональная модель к выявлению и классификации рисков, связанных с инспекций, достоверностью данных, а также человеческим фактором.

Ключевые слова: надзорная деятельность, безопасность пищевой продукции, процессная модель, идентификация источников рисков.

IDENTIFICATION OF RISK FACTORS OF THE INSPECTION PROCESS IN THE FOOD INDUSTRY INDUSTRIES

Kachanova Y. I., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. In food product supervision, it is critically important to correctly identify and assess risks in order to minimize the likelihood of incorrect decisions. In the context of increasing requirements for food safety and limited resources of supervisory authorities, the task of increasing the effectiveness of supervisory activities is becoming urgent. One of the key tools in this area is the identification of risk factors that arise during the supervision process. The report examines a functional model for identifying and classifying risks related to inspections, data reliability, and the human factor.

Keywords: supervisory activities, food safety, process model, identification of risk sources.

Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Актуальность темы обусловлена важностью обеспечения безопасности и качества продуктов питания. В условиях глобализации и увеличения объемов производства и потребления пищевой продукции, надзорные органы сталкиваются с множеством вызовов, связанных с контролем и регулированием этой сферы. Некорректные решения могут привести к серьезным последствиям, таким как распространение небезопасных продуктов, ухудшение здоровья населения и снижение доверия к надзорным органам

Основная цель – минимизация рисков некорректного принятия решений в процессе проверок [1].

На первом этапе был реализован процессный подход к анализу надзорной деятельности пищевой продукции. В основу моделирования процесса надзорной деятельности положена методология функционального моделирования бизнес-процессов IDEF0. Методология позволяет визуализировать бизнес-процессы (состав, последовательность, взаимодействия и взаимосвязи) для целей их комплексного анализа [2].

Построенная функциональная модель деятельности надзорного органа в состоянии «как есть» является основой системного поиска и идентификации источников частных рисков недостижения поставленных целей процесса надзорной деятельности.

Интегральный риск процесса надзорной деятельности заключается в минимизации ошибок первого и второго рода: качественная пищевая продукция определяется инспекцией как несоответствующая требованиям и наоборот, некачественная пищевая продукция определяется инспекцией как соответствующая требованиям [3].

Частные риски отражают вклад в интегральный риск негативных проявлений подпроцессов надзорной деятельности и задействованных ресурсов.

Очевидно, что функциональная модель деятельности надзорного органа является своеобразным скелетом (навигатором) для идентификации всех возможных источников частных рисков [4].

Использование функциональной модели деятельности надзорного органа для поиска и идентификации источников частных рисков обеспечивает выполнение критериев полноты и не избыточности в решении данной задачи.

В докладе рассмотрена методика поиска источников частных рисков по иерархии подпроцессов функциональной модели деятельности надзорного органа.

Проведен анализ подпроцессов надзорной деятельности «сверху вниз» – от контекстной схемы надзора до рабочих диаграмм.

– Контекстная диаграмма А-0. Объекты анализа – ресурсы бизнес – процесса. Задача – идентифицировать ресурсы и их уязвимости («механизмы», «входы», «управления»), являющиеся источниками потенциальных угроз недостижения стратегических целей бизнес-процесса в области качества, связанных с внешней средой [5].

– Диаграмма – модуль «системный цикл Р-D-C-A». Объекты анализа – подпроцессы первого уровня иерархии бизнес – процесса (функции диаграммы – модуля). Задача – идентифицировать подпроцессы и их уязвимости, имеющие значимое влияние на недостижение целей бизнес – процесса в целом.

– Диаграмма-модуль «поток работ». Объекты анализа – подпроцессы нижнего уровня иерархии бизнес – процесса (функции диаграммы – модуля). Задача – идентифицировать подпроцессы и их уязвимости, имеющие значимое влияние на недостижение целей потока работ.

– Диаграмма-модуль «отдельно взятая функция потока работ». Объекты анализа – ресурсы процесса (функции). Задача – идентифицировать ресурсы и их уязвимости («механизмы», «входы», «управления»), являющиеся источниками потенциальных угроз недостижения стратегических целей данного процесса.

Следует отметить, что уязвимости активов (функций и ресурсов) в рамках каждой диаграммы рассматриваются как нежелательное свойство актива, которое может породить угрозу

недостижения целей бизнес – процесса. Уязвимости активов – это и есть предмет обработки рисков, т. е. минимизации и нормирования. Каждый актив может иметь несколько уязвимостей, способных породить угрозу недостижения одной или нескольких целей процесса.

Если идентификация активов является по своей сути объективным процессом, т. к. полное множество активов, потенциально влияющих на недостижение целей, нам указывает функциональная модель процесса, то выявление уязвимостей активов является субъективным процессом, так как в большинстве случаев это можно сделать только экспертными методами, например, методами анкетирования, опроса, мозгового штурма и т.п. И здесь очевидны проблемы, связанные с вероятностью не идентификации уязвимостей

Для количественной оценки выявленных потенциальных рисков недостижения целей надзорной деятельности по причине несоответствий ресурсов, задействованных в потоках работ была применена методика на основе FMEA-анализа.

Это метод системного анализа, направленный на выявление существенных потенциальных несоответствий в процессе (из всего множества идентифицированных потенциальных несоответствий) и оценку их последствий. В контексте надзора за пищевой продукцией FMEA мощный инструмент для предупреждения рисков, повышения эффективности инспекций и оптимизации ресурсов. Например: планирование проверки, отбор проб, лабораторный анализ, оформление результатов [6, 7].

В целом, предложенный подход способствует повышению результативности инспекционного контроля и снижению рисков его достоверности и объективности.

Литература

1. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
2. О совершенствовании контрольной (надзорной) деятельности в Республике Беларусь: Указ Президента Респ. Беларусь от 16.10.2009 № 510 // Национальный правовой Интернет-портал. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P30900510>.
3. Козбаненко, В. А. Основы государственного муниципального управления: учеб. пособие / В. А. Козбаненко. – М., 2002. – 35 с.
4. ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции. – Введ. 01.07.2013. – М.: Евразийская экономическая комиссия, 2011. – 182 с.
5. Серенков, П. С. Методология риск-менеджмента в рамках СМК на основе комплексного процессного подхода (часть 1) / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015. – № 10. – С. 12–17.
6. Никаноров, П. А. Управление рисками в менеджменте качества / П. А. Никаноров. – СПб., 2019. – 105 с.
7. Шухарт, У. А. Экономический контроль качества произведенного продукта / У. А. Шухарт. – Нью-Йорк: Вэн Ноустренд, 1931. – 50 с.

УДК 681

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ

Кубрин Д. С., Гомма М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Основная задача любого предприятия заключается в удовлетворении потребностей потребителей и получение прибыли, тем самым обеспечивая себе устойчивое развитие. Однако повышение прибыли напрямую зависит от количества и качества выпускаемого предприятием продукции. В связи с этим существует проблема оптимизации производственных расходов. Данная работа рассматривает тенденцию автоматизации измерений с целью уменьшения производственных расходов.

Ключевые слова: автоматизация измерений, метрология, обеспечение единства измерений.

THE POSSIBILITY OF USING AUTOMATION OF MEASUREMENTS IN ENTERPRISES TO REDUCE PRODUCTION COSTS

Kubryn D. S., Homma M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The main task of any enterprise is to satisfy the needs of consumers and make a profit, thereby ensuring sustainable development. However, increasing profits directly depends on the quantity and quality of the products manufactured by the enterprise. In this regard, there is a problem of optimizing production costs. This work examines the trend of automating measurements in order to reduce production costs.

Keywords: automation of measurements, metrology, ensuring the uniformity of measurements.

*Адрес для переписки: Кубрин Д. С., ул. Я. Коласа, 22, 522, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dk250036@gmail.com*

В условиях мировой глобализации рынка и ежегодным ужесточением конкуренции между предприятиями, белорусские предприятия машиностроения и приборостроения, сталкиваются с необходимостью повышения качества выпускаемой продукции и эффективности производственной системы, а также с уменьшением производственных издержек. Так, одним из ключевых видов издержек на предприятиях выступает контроль качества (измерения), затраты на которые составляют от 5 – 25 % от стоимости конечного изделия (в зависимости от выпускаемой продукции). Эта доля затрат ложится на ручной труд работников ОТК, простои, связанные с временем измерения, а также возможности не выявления брака (в случаях не сплошного контроля). В связи с этим во всем мире ведутся научные споры и разговоры об том, как избавиться от измерительных затрат на производстве.

В результате этих споров предлагается концепция автоматизации измерений. Сущность концепции заключается в переносе этапа измерения с момента готового изделия на момент изготовления этого изделия. Уже сегодня существуют достаточно высокоточные станки с ЧПУ, в которых интегрированы координатно-измерительные машины, оптические и лазерные сканеры, системы машинного зрения и т. д. Однако, после изготовления на дымных станках изделия оно отправляется на контроль. Данная концепция таит в себе огромный потенциал снижения стоимости конечного изделия, времени его изготовления, уменьшения материально-технической базы предприятия и тем самым стоимости.

Преимущества автоматизации измерения:

- повышение точности и исключение человеческого фактора при измерении;
- увеличение скорости и производительности;
- снижение операционных затрат на появление брака;
- уменьшение материально-технической базы и сокращение численности персонала ОТК;
- повышение безопасности труда;
- переход в Индустрию 4.0 в долгосрочной перспективе.

Недостатки автоматизации измерения:

- высокие первоначальные затраты;
- риск простоев в случаях выхода из строя измерительного оборудования;
- подходит только серийному и массовому производству.

Концепция автоматизации измерений не позволяет полностью избавиться от измерений конечного изделия. Она кардинально снижает необходимость и частоту финального контроля. У данной концепции есть 4 возможные модели:

Интегрированный контроль – станок оснащается измерительным щупом, который устанавливается в шпиндель как обычный режущий инструмент. После завершения обработки или в паузе станок автоматически меняет резец на щуп, касается им определенных точек на детали и замеряет ключевые параметры. Цель: проверить геометрию, смещение заготовки, компенсировать износ инструмента. Данная модель нашла широкое применение в фармацевтическом и биофармацевтическом производстве

Внутриконтурное измерение – измерение является частью одной управляющей программы и выполняется автоматически в рамках одного

рабочего цикла станка. Оператору не нужно вмешиваться; станок сам выполняет обработку, затем измерение, и на основе результатов измерений может принять решение (например, скорректировать смещение инструмента для следующего прохода или следующей детали).

Активный контроль – измерение происходит непосредственно во время резания (в реальном времени). Здесь измеряются не геометрические параметры, а силы резания, вибрации, температура. Цель: не измерить деталь, а предотвратить брак «до того, как он произойдет». Система отслеживает аномалии (например, резкий рост вибрации, указывающий на поломку инструмента) и мгновенно останавливает станок или изменяет режимы резания.

Замкнутый контур измерения – идеальная концепция, когда измерений не просто констатируют факт, а автоматически и непрерывно используются для корректировки и улучшения процесса, т. е. измерения – своеобразный «орган чувств» станка.

Однако, существуют также технические, методические и законодательные проблемы реализации автоматизации измерений. Главными из которых являются:

Обеспечение точности и стабильности измерения – поскольку, система СПИД под влиянием внешних факторов довольно нестабильна (температуры, вибрация, электромагнитные помехи) перенос измерения с приспособленных лабораторий в изготавливаемые станки практически невозможно.

Износ и отсутствие нормальных условий измерений – хотя эта проблема может и быть устранена, но учет износа оборудования требует разработки новых методик оценки точности измерения.

Сложность валидации ПО – любое программное обеспечение, применяемое в лаборатории, должно быть валидировано. Согласно ГОСТ ISO 17025 лаборатория обязана убедиться в правильности применяемых методов измерений. Без наличия исходных кодов никак проверить правильность работы программного обеспечения станка практически невозможно.

Несоответствие требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений – согласно закону: средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее метрологические характеристики, значения которых принимаются неизменными в течение определенного времени. Тем самым станок не является средством измерения, а также у станка отсутствует единство измерений – состояние измерений, при котором результаты этих измерений выражены в допущенных к применению в Республике Беларусь единицах величин, обеспечена метрологическая прослеживаемость, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью. Возникает вопрос об организации метрологической прослеживаемости у станка.

Межповерочный интервал – если все-таки удастся использовать станок как средство измерения появляется вопрос об его межповерочном интервале, по сколько станок находится не в нормальных условиях, то величина межповерочного интервала будет маленькой.

Данные модели активно применяются в развитых странах, что позволяет им экономить средства и время на изготовления и контроль конечного изделия.

Литература

1. Об обеспечении единства измерений: Закон Респ. Беларусь от 05.09.1995 № 3848-XII // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Z9503848> (дата обращения: 20.07.2025).
2. Общие проблемы автоматизации поверочных лабораторий // Unitess: [сайт]. – URL: <https://unitess.ru/download/obshchie-problemy-avtomatizacii-poverochnyh-laboratoriy-0.html> (дата обращения: 16.09.2025).
3. Внутрипроизводственный контроль (IPC) // Pharmuni: [сайт]. – URL: <https://pharmuni.com/glossary/in-process-control/> (дата обращения: 16.09.2025).

УДК 681

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ

Кубрин Д. С., Николайчик Ю. А., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Основным способ повышения конкурентоспособности предприятия является повышения качества продукции. Однако, для определения факторов производственной среды, влияющих на качество необходимо большое количество испытаний. Данная работа использует в качестве источника информации опрос экспертов, методом альтернатив эксперт заполняет анкету, которая в последующем анализируется и определяются ключевые показатели качества.

Ключевые слова: показатели качества, экспертное оценивание, взаимозависимые показатели.

DETERMINATION OF KEY QUALITY INDICATORS OF CASTING IN SAND-CLAY MOLDS USING EXPERT EVALUATION METHODS

Kubryn D. S., Nikolaychik Y. A., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The main way to increase the competitiveness of an enterprise is to improve the quality of its products. However, to determine the factors of the production environment that affect quality, a large number of studies are needed. This work uses a survey of experts as a source of information; using the method of paired comparisons, the expert fills out a questionnaire, which is then analyzed and key quality indicators are determined.

Keywords: quality indicators, expert assessment, interdependent indicators

Адрес для переписки: Кубрин Д. С., ул. Я. Коласа, 22, 522, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dk250036@gmail.com

В условиях жесткой рыночной конкуренции, поддержание и повышение конкурентоспособности современного литейного производства напрямую связано с непрерывным улучшением качества отливок, оптимизацией технологических операций и уменьшением вкладов производственной среды в дефектность отливок. Эффективная минимизация несоответствий продукции требует всестороннего анализа носителей дефектов и разработки превентивных мер по их предупреждению. Использование математических моделей и исследовательских испытаний затруднено в силу многопараметричности литейного производства как процесса. Использование методов экспертной оценки является ключевым, а зачастую и безальтернативным подходом.

В докладе предложено решение задачи выбора приоритетов совершенствования процесса литья в песчано-глинистые формы.

Определение ключевых показателей качества литья в песчано-глинистые формы – основополагающий этап для оценки значимости факторов производственной среды, влияющих на качество литья. Недопустимость ошибок при определении ключевых показателей качества является критическим требованием, поскольку это приведет к систематической погрешности в экспертных оценках на всех последующих этапах анализа, искажая итоговое определение весомости факторов производственной системы.

В основу решения задачи положен метод альтернатив, обеспечивающий, с одной стороны, представление результатов количественной оценки предпочтительности того или иного объекта совершенствования в шкале интервалов, с другой стороны, достаточную достоверность оценок в силу применения статистических критериев степени внутренней уверенности каждого эксперта и степени согласованности мнений экспертов в группе [1].

Реализация метода альтернатив предполагает два этапа:

1 этап – формирование массива показателей качества отливок и качественное (интуитивное) ранжирование по приоритетности анализируемых;

2 этап – определение количественных значений приоритетности анализируемых показателей качества отливок.

Первый этап ранее не рассматривался как значимый для получения достоверных результатов оценивания. Однако при его практической реализации был установлен ряд существенных моментов, влияющих на достоверность конечных результатов.

В докладе приведена реализация первого этапа в отношении показателей качества литья в песчано-глинистые формы. Путем анализа технической литературы и потребностей потребителей были выявлены девять показателей качества. Перед началом опроса каждый эксперт предварительно качественно ранжировал показатели качества, а затем реализовывал методику оценивания по методу альтернатив отвечая на вопросы анкеты по плану А и В.

Результат анализа внутренней согласованности одного из экспертов представлен на рисунке 1.

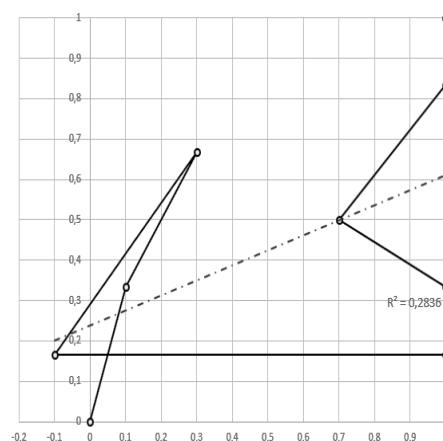


Рисунок 1 – График достоверности оценок эксперта до устранения взаимозависимых показателей качества

В идеале все точки (ломаная линия) должны лежать на прямой, тогда $R^2 = 1,0$. Как следует из рисунка достоверность оценок эксперта крайне низкая ($R^2 = 0,283$). График на рисунке 1 демонстрирует, что эксперт был крайне неуверен при заполнении анкеты. Повторный опрос экспертов несколько повысил достоверность оценок, но результат по-прежнему оставался неприемлемым. Было решено провести совещание с каждым экспертом по вопросу внутренней несогласованности.

По результатам совещания была установлен эффект влияния взаимозависимости показателей качества между собой (логической корреляции). В исходном массиве анализируемых показателей качества отливок оказались взаимозависимые показатели качества, такие как: Геометрическая точность, Долговечность, Качество поверхности, Коррозионная стойкость, Механические свойства, Микроструктура, Надежность, Химический состав, Эстетичность. Например, показатель качества «Эстетичность» в себе содержит показатели

«Геометрическая точность», «Качество поверхности», «Коррозионная стойкость».

Наличие взаимозависимых показателей вводит в заблуждение эксперта и как следствие дает низкую достоверность полученных оценок. После пересмотра всего массива исходных показателей качества были выявлены первичные (независимые) показатели качества, такие как: Геометрическая точность, Качество поверхности, Коррозионная стойкость, Механические свойства, Микроструктура, Пористость, Химический состав. Далее был проведен повторный опрос экспертов, в результате которого достоверность оценок экспертов достигла приемлемого результата.

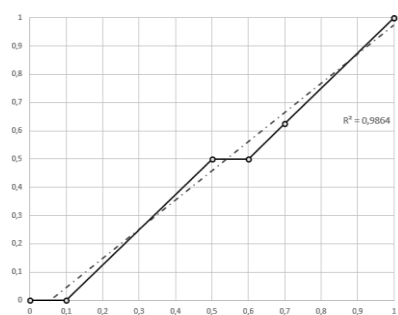


Рисунок 2 – График достоверности оценок эксперта после устранения взаимозависимых показателей качества

Выявленная проблема взаимозависимости между отдельными показателями качества приводит к снижению достоверности экспертных оценок, что искажает итоговую оценку влияния факторов производственной среды на качество отливок.

Устранение выявленных корреляций между показателями качества, посредством экспертного совещания и последующей переоценки, позволило существенно повысить достоверность экспертных оценок до $R^2 = 0,986$, результат представлен на рисунке 2.

Данный опыт указывает на необходимость тщательной предварительной проработки показателей качества и исключения их взаимозависимости, что способствует повышению надежности экспертных оценок, используемых в управлении качеством литейного производства.

Проблема взаимозависимых показателей не единственная проблема, возникшая в результате реализации первого этапа. Проблема разных приоритетов ранжирования показателей качества при анализе согласованности экспертов между собой является более значимой, однако в данном докладе не рассматривается.

Литература

1. Серенков, П. С. Исследование достоверности методов экспертного оценивания / П. С. Серенков, В. М. Романчук, Н. Н. Гиль // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 1. – С. 22–30.

УДК 681

ПРОБЛЕМА НЕСОГЛАСОВАННОСТИ МНЕНИЙ В ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОПРЕДЕЛЕНИИ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ

Кубрин Д. С., Николайчик Ю. А., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Развитие компании и повышение прибыли напрямую зависит от количества и качества выпускаемой продукции. Существует проблема в определении факторов, влияющих на качество будущего изделия, такая как отсутствие достоверных данных вкладов производственной системы на качество продукции. В данном исследовании в качестве источника достоверных данных выступают эксперты, заполняющие анкету методом альтернатив. Однако, в следствии реализации анализа анкет экспертов была выявлена проблема, рассматриваемая в данном докладе.

Ключевые слова: показатели качества, экспертное оценивание, согласительное совещание.

THE PROBLEM OF INCONSISTENCY OF OPINIONS IN THE EXPERT EVALUATION AS A RESULT OF DETERMINING KEY INDICATORS OF CASTING QUALITY IN SAND-CLAY MOLDS

Kubryn D. S., Nikolaychik Y. A., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The development of the company and increase in profit directly depends on the quantity and quality of manufactured products. There is a problem in determining the factors affecting the quality of the future product, such as the lack of reliable data on the contributions of the production system to the quality of products. In this study, experts filling out a questionnaire using the alternative method act as a source of reliable data. However, as a result of the analysis of the expert questionnaires, the problem considered in this report was identified.

Keywords: quality indicators, expert assessment, agreement meeting

Адрес для переписки: Кубрин Д. С., ул. Я. Коласа, 22, 522, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dk250036@gmail.com

Литье в песчано-глинистые формы хоть и является одним из первых методов литья освоенным человеком, однако данный метод не утратил свою актуальность, поскольку этот метод изготовления отливок для некоторых изделий является единственным. Повышение качества литья – ключевая задача для развития литейного производства, повышение конкурентоспособности и укрепление промышленного потенциала Республики Беларусь.

Связи с этим необходим глубокий анализ источников производственной системы, влияющих на качество литья в песчано-глинистые формы, для определения их вкладов в качество отливок.

Однако существует проблемы в определении вкладов источников производственной системы на качество отливок, такие как: отсутствие достоверных данных об весомостях источников производственной системы, сложность построения математической модели анализа источников производственной системы, невозможность проведения исследовательских испытаний в контролируемых условиях. Из-за наличия данных проблем, использование методов экспертной оценки, в качестве источника знаний, является незаменимым.

Прежде, чем определить весомость источников производственной системы, необходимо понимать следующее: какие показатели качества отливок являются значимыми (1 этап), какие группы дефектов влияют на показатели качества и на сколько именно (2 этап), какие дефекты наиболее значимы в группе идентифицированных дефектов (3 этап), какие причины, вызывающие дефекты, наиболее весомые (4 этап), какие источники производственной системы наиболее значимы для каждой причины (5 этап). В данном докладе рассматривается первый этап.

В основу данного исследования положен метод альтернатив, обеспечивающий, с одной стороны, представление результатов количественной оценки предпочтительности того или иного объекта совершенствования в шкале интервалов, с другой стороны, достаточную достоверность оценок в силу применения статистических критериев степени внутренней уверенности каждого эксперта и степени согласованности мнений экспертов в группе. [1].

Реализация метода альтернатив предполагает, в свою очередь, два этапа:

1 этап – формирование массива показателей качества отливок и качественное (интуитивное) ранжирование по приоритетности анализируемых;

2 этап – определение количественных значений приоритетности анализируемых показателей качества отливок.

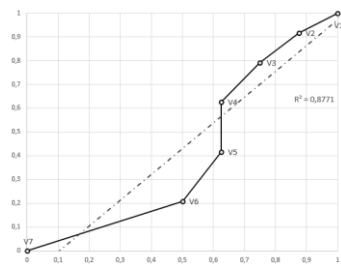


Рисунок 1 – График достоверности оценок первого эксперта

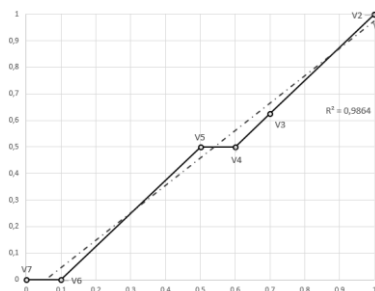


Рисунок 2 – График достоверности оценок второго эксперта

Перед началом опроса каждый эксперт предварительно качественно ранжировал показатели качества, а затем реализовывал методику оценивания по методу альтернатив отвечая на вопросы анкеты по плану А и В. В результате были получены: качественно проранжированные показатели качества и количественное значение приоритетности показателей качества отливок.

В результате анализа была выявлена проблема взаимозависимых показателей качества. Данная проблема была устранена и не рассматривается в данном докладе.

По результатам опросов двух экспертов были получены графики достоверности двух экспертов, представленные на рисунках 1 и 2.

В идеале все точки (ломаная линия) должны лежать на прямой, тогда показатель $R^2 = 1,0$. Как следует из рисунка 2, достоверность оценок экспертов крайне высокая ($R^2 = 0,877$ и $0,986$). Эти два графика демонстрируют, что эксперты уверенно заполняли анкеты.

Для удобства последующего анализа согласованности экспертов между собой сведем данные оценок экспертов в таблицу, представленную на рисунке 3. Как следует из рисунка 3, каждый эксперт по-разному качественно предварительно проранжировал показатели качества. Так, например, показатель «Химический состав» для первого эксперта самый незначимый, а для второго эксперта один из значимых.

Показатель	Значение эксперта №1			Значение эксперта №2		
	План А	План В	Среднее	План А	План В	Среднее
Геометрическая точность	1,000	1,000	1,000	0,600	0,500	0,550
Качество поверхности	0,875	0,916	0,896	0,500	0,500	0,500
Пористость	0,750	0,791	0,771	0,100	0,000	0,050
Механические свойства	0,625	0,625	0,625	1,000	1,000	1,000
Коррозионная стойкость	0,625	0,416	0,521	0,000	0,000	0,000
Микроструктура	0,500	0,208	0,354	0,700	0,625	0,663
Химический состав	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Рисунок 3 – Таблица количественного значения показателей качества

По полученным из рисунка 3 данным были рассчитаны значения: коэффициента корреляции показателей качества между собой ($-0,41$) и коэффициент конкордации Кендалла ($0,31$). Из рассчитанных значений можно сделать вывод, что оценки экспертов имеют обратную связь (т. е. с увеличением ранга показателя качества у одного эксперта у другого он уменьшается), т. е. эксперты взаимно не согласованны.

Данная проблема не позволяет проводить дальнейший анализ значимости показателей качества отливок. Для решения проблемы было решено провести согласительное совещание между экспертами. Проведение согласительного совещания позволяет экспертам услышать мнение другого эксперта, убедить другого эксперта в своем мнении и прийти к общему консенсусу.

По результатам проведенного согласительного совещания было решено еще раз провести

опрос экспертов, в результате которого были уточнены количественные и качественные значения показателей качества, которые представлены на рисунке 4.

Показатель	Значение эксперта №1			Значение эксперта №2		
	План А	План В	Среднее	План А	План В	Среднее
Геометрическая точность	1,000	1,000	1,000	0,875	0,916	0,896
Качество поверхности	0,875	0,833	0,854	1,000	1,000	1,000
Пористость	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
Механические свойства	0,625	0,625	0,625	0,625	0,583	0,604
Коррозионная стойкость	0,500	0,458	0,479	0,208	0,166	0,187
Микроструктура	0,375	0,250	0,313	0,500	0,500	0,500
Химический состав	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Рисунок 4 – Таблица количественного значения показателей качества после согласительного совещания

Проведение согласительного совещания позволило прийти к общему мнению относительно качественного и количественного значения показателей качества. Значение коэффициента корреляции на рисунке 3 равно $0,90$, а значение коэффициента конкордации Кендалла равно $0,964$.

Литература

1. Серенков, П. С. Исследование достоверности методов экспертного оценивания / П. С. Серенков, В. М. Романчук, Н. Н. Гиль // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 1. – С. 22–30.

УДК 551.501.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Кудина А. В.¹, Франко Е. П.¹, Есьман Г. А.², Угланова Е. Р.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Моделирование процессов контроля показателей качества электронных средств является важным аспектом обеспечения надежности и безопасности их работы. Этот процесс включает создание и анализ моделей, прогнозирующих поведение электронных систем в разных условиях эксплуатации. Моделирование помогает улучшить качество продукции, удовлетворить потребности потребителей, повысить конкурентоспособность предприятий и обеспечить соответствие стандартам.

Ключевые слова: электронные средства, моделирование, контроль качества, испытания.

FORECASTING MODELS GENERATION OF THE ELECTRONIC MEANS QUALITY

Kudina A. V.¹, Franco E. P.¹, Esman G. A.², Uglanova E. R.¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Modeling the processes of quality control of electronic means is an important aspect of ensuring the reliability and safety of their operation. This process includes the creation and analysis of models that predict the behavior of electronic systems in different operating conditions. Modeling helps to improve product quality, meet the needs of consumers, increase the competitiveness of enterprises and ensure compliance with standards.

Keywords: electronic tools, modeling, quality control, testing.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. П. Бровки 6, г. Минск, 22013, Республика Беларусь
e-mail: a.kudina@bsuir.by

Введение. В современном мире электронные средства играют важную роль во многих отраслях, таких как производство, транспорт, медицина и образование. Однако для обеспечения надежности и безопасности их работы необходимо контролировать показатели качества. Контроль – это мероприятия, включающие проведение измерений, испытаний, проверку одной или нескольких характеристик изделия или услуги и их сравнение с установленными требованиями с целью установления соответствия.

Моделирование процессов контроля показателей качества электронных средств – это процесс создания и анализа моделей, которые описывают и прогнозируют поведение электронных систем и их компонентов в различных условиях эксплуатации. Моделирование процессов контроля показателей качества электронных средств – это актуальная задача, связанная с повышением эффективности диагностирования и обеспечением контролепригодности при проектировании электронных устройств.

Основные аспекты моделирования. Моделирование – это процесс создания и изучения моделей объектов, явлений или процессов с целью получения информации о них. В контексте контроля качества электронных средств моделирование позволяет прогнозировать поведение формул должна идти последовательно. Ссылки устройств в различных условиях эксплуатации, оценивать их надежность и выявлять возможные дефекты.

Существует множество методов моделирования, которые можно использовать для контроля качества электронных средств.

Математическое моделирование использует математические формулы и уравнения для описания и анализа процессов, происходящих в электронных устройствах. Он позволяет проводить расчеты и прогнозирование поведения устройств в различных режимах работы.

Физическое моделирование основано на создании физических моделей электронных компонентов и устройств, которые имитируют их работу в реальных условиях. Физическое моделирование позволяет проводить испытания и эксперименты с устройствами, что помогает выявить и устранить возможные дефекты.

Компьютерное моделирование использует компьютерные программы, различные приложения и алгоритмы для создания виртуальных моделей электронных устройств. Компьютерное моделирование позволяет быстро и точно проводить расчеты и анализ характеристик устройств, а также визуализировать результаты.

Этапы моделирования. Процесс моделирования контроля качества электронных средств включает следующие этапы [1]:

1. Сбор и анализ исходных данных. На этом этапе собираются данные об устройстве, его компонентах и характеристиках. Также проводится анализ требований к качеству и безопасности работы устройства.

2. Создание модели. На этом этапе выбирается метод моделирования и создается модель устройства. Модель должна быть точной и соответствовать реальным условиям эксплуатации.

3. Проведение испытаний и экспериментов. На этом этапе модель подвергается различным воздействиям и испытаниям, чтобы проверить ее работоспособность и надежность.

4. Анализ результатов. После проведения испытаний и экспериментов анализируются полученные результаты. Выявляются возможные дефекты, слабые места и проблемы в работе устройства.

Применение моделирования. Моделирование контроля качества электронных средств применяется в различных отраслях и сферах деятельности. Вот некоторые примеры:

– Производство электронных компонентов и электронных устройств. Компании используют моделирование для контроля качества своей продукции, чтобы обеспечить надежность и безопасность своих устройств.

– Транспорт. Автомобильные компании применяют моделирование для контроля качества электронных систем автомобилей, чтобы повысить их надежность и безопасность.

– Медицина и здравоохранение. Медицинские устройства, такие как кардиостимуляторы и импланты, должны быть тщательно протестированы и проверены перед выпуском на рынок. Моделирование помогает ускорить этот процесс и повысить качество продукции.

Основные аспекты процессов контроля качества. Технический контроль – это проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит ее качество, установленным требованиям технических нормативных правовых актов. На стадии разработки продукции технический контроль заключается в проверке соответствия опытного образца техническому заданию, технической документации, правилам оформления, изложенным в ЕСКД.

Контроль классифицируют по следующим признакам [2]:

– средствам контроля: измерительный контроль, регистрационный контроль;
– периодичность во времени: непрерывный и периодический контроль;
– степень участия человека: ручной контроль, полуавтоматический контроль, автоматический контроль.

Технический контроль включает три основных этапа:

1) получение первичной информации о фактическом состоянии объекта контроля, его контролируемых признаках и показателях;

2) получение вторичной информации – отклонений от заданных параметров – путем сопоставления первичной информации с запланированными критериями, нормами и требованиями;

3) подготовка информации для выработки соответствующих управляющих воздействий на объект, подвергавшийся контролю.

Контроль осуществляется по контролируемому признаку.

Контролируемый признак – это количественная или качественная характеристика свойств объекта, подвергаемого контролю. Комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение производства продукции с заданным уровнем качества, составляет предмет организации контроля [3].

Заключение. Моделирование процессов контроля качества электронных компонентов и средств является важным инструментом для обеспечения надежности и безопасности работы электронных устройств. Использование различных методов моделирования позволяет проводить

расчеты, испытания и эксперименты, что помогает выявлять и устранять возможные дефекты и проблемы в работе устройств.

Литература

1. Контроль качества электронных средств // Studfile: [сайт]. – URL: <https://studfile.net/preview/2619108/page:17/> (дата обращения: 20.06.2025).
2. Абомелик, Т. П. Управление качеством электронных средств: учеб. пособие / Т. П. Абомелик. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 127 с.
3. Top Quality Control Methods in Electronics Manufacturing // Vanti: [сайт]. – URL: <https://www.vanti.ai/top-quality-control-methods-in-electronics-manufacturing/> (дата обращения: 20.06.2025).

УДК 658.562

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ

Липаткина Т. Н.¹, Серенков П. С.²

¹ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Для достижения поставленных целей организации, оперативного решения возникающих вопросов, принятия оптимальных решений в условиях быстро меняющегося рынка необходим быстрый поиск актуальной информации, знаний, опыта организации. В данной работе проведено исследование информационных технологий управления знаниями, в частности систем управления знаниями. Систематизирована информация о целях и функциях внедрения СУЗ в организациях, принципы создания, востребованность, приведены результаты, которых может достичь организация при использовании СУЗ, ошибки и решения для их предотвращения при внедрении СУЗ. Представлен обзор зарубежных и российских систем управления знаниями. Рассмотрены основные технологические тренды, которые будут определять будущее платформ управления знаниями в ближайшие годы.

Ключевые слова: система управления знаниями, знания организации, опыт организации, информация.

RESEARCH ON KNOWLEDGE MANAGEMENT SYSTEMS

Lipatkina T. N.¹, Serenkov P. S.²

¹ OJSC “BSW - management company of «BMC» holding”, Zhlobin, Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. To achieve the objectives set by the organization, to quickly address emerging issues, and to make optimal decisions in a rapidly changing market, quick access to relevant information, knowledge, and experience within the organization is essential. This work presents a study of information technologies for knowledge management, specifically knowledge management systems. The information about the goals and functions of implementing a Knowledge Management System (KMS) in organizations is systematized, including principles of creation, demand, and the results that an organization can achieve through the use of a KMS, as well as mistakes and solutions to prevent them during implementation. An overview of foreign and Russian knowledge management systems is presented. The main technological trends that will define the future of knowledge management platforms in the coming years are discussed.

Keywords: knowledge management system, organizational knowledge, organizational experience, information.

Адрес для переписки: Серенков П. С., ул.Я. Коласа, 22, 518, г. Минск, 220113 Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Во многих организациях существуют проблемы с информационной перегруженностью, оперативным доступом к информации, которая рассредоточена в различных форматах в базах данных, хранилищах документов, отчетах, личных компьютерах; с отсутствием сохранения прошлого опыта, что приводит к непрофессиональным действиям; сохранением опыта и знаний при увольнении сотрудника; организацией процесса передачи опыта и знаний работникам; обучением

и адаптацией новых работников; актуализацией устаревших знаний.

Для решения данных вопросов, систематизации знаний организации используют системы управления знаниями (Knowledge Management System, KMS, КМ-система – далее СУЗ). СУЗ – цифровые платформы для создания, хранения, обмена, распространения и применения знаний внутри организации. В литературе много зарубежных примеров эффективного использования систем управления

знаниями в компаниях, и не много информации о применении СУЗ в России и Беларуси. В данной работе проведено исследование применяемых сегодня зарубежных и российских СУЗ. Зарубежные системы развивались годами тысячами работников и были созданы под конкретные задачи, российские разработчики строят новые продукты с функциональными платформами. Развитие рынка импортозамещающих решений идет быстрыми темпами, учитывая текущую геополитическую ситуацию, введение ограничений на использование зарубежных систем, прекращение поддержки зарубежными компаниями своих продуктов, без возможности продления лицензий и обновлений на территории РФ, РБ [1]. В России по итогам 2023 года были проведены исследования по рынку российских СУЗ командой PLUS-Consulting [2]. В исследовании приняли участие: Документерра, TEAMLY, ХайХаб, MyBase.pro, L2U InKnowledge, CraftTalk, EvaTeam. В рейтинге составленному Рувард [3], кроме российских проанализированы и зарубежные разработки: Confluence, Notion. Исследования показывают, что российские СУЗ с успехом позволяют перенести данные и заменить ушедшие с рынка зарубежные решения. В СУЗ внедряются встроенные решения на основе искусственного интеллекта, которые способны в режиме реального времени генерировать сотруднику развернутые ответы на основе содержимого СУЗ с указанием ссылок на материалы, что позволяет использовать без риска распространения неподтвержденных данных.

Управление корпоративными знаниями становится в России все популярнее, а знания и практический опыт становятся заметным и ценным активом, который необходимо наращивать, сохранять и использовать внутри компании. На сайтах организаций все больше информации о переходе российских организаций на платформы СУЗ (например Naumen [4], VK People Hub [5] и другие).

В работе представлены основные решения, которые будут определять будущее платформ управления знаниями в ближайшие годы [6]:

- 1) искусственный интеллект. Применение технологий NLU (Natural-language understanding) и LLM+RAG (Large Language Models and Retrieval Augmented Generation) механик;
- 2) персонализация и microlearning (поточное обучение), adaptive learning (адаптивное обучение);
- 3) цифровые двойники (Digital Twins) и AI-аватары;
- 4) Бесшовная интеграция знаний в workflow.

Для организаций СУЗ полезный инструмент оптимизации и развития бизнеса. С их помощью возможно собрать и сохранить всю внутреннюю информацию, организовать оперативный обмен данными для эффективной работы сотрудников. Организованное управление знаниями помогает избежать дублирования работы, облегчает принятие взвешенных решений. Опыт реализации решений может подтолкнуть коллег на новые идеи.

При планировании внедрения СУЗ в процессы организации необходимо четко установить цель

внедрения, которая направлена на достижение целей организации. Определить и структурировать информацию, которая будет размещена на платформе, разработать единые шаблоны оформления документов. В шаблонах предусмотреть указание автора документа, для сохранения авторского права и даты документа, для понимания актуальности данных и необходимости актуализации. Необходимо избегать перегруженности информацией, СУЗ должна быть удобным инструментом для сотрудников. Работа с персоналом – одна из первоочередных задач, ни одна система не будет эффективно работать, если ей не пользуются сотрудники, необходимо обучить сотрудников работать в системе, объяснить зачем это нужно, мотивировать к работе, создать условия, когда выгодно обмениваться знаниями, по возможности исключить в организации другие пути работы с информацией. Проработать вопросы информационной безопасности и разграничения прав к доступу информации. Разработать процессы мониторинга системы и оценки эффективности, количество посещений, запросы, проведение анкетирования сотрудников для улучшения работы (получение обратной связи). Работа с актуализацией информации: частота обновлений, внесение изменений.

Основными результатами при внедрении СУЗ организации называют: ускорение доступа к информации, оптимизация принятия решений, работа по единым алгоритмам (стандартизация процессов), безопасность данных при централизованном хранении информации, накопление и передача знаний и опыта.

Выводы. Конкуренция на рынке вынуждает организации обращаться к важнейшему ресурсу – знаниям организации и опыту сотрудников, которые должны храниться и распространяться. Для данных целей, а также для оперативного поиска нужной информации внедряются цифровые решения – СУЗ. Результаты внедрения СУЗ в организациях свидетельствуют о повышении эффективности поиска информации, сохранении и передаче опыта организации, оперативности принятия обоснованных решений, распространении передовых практик, появлении новых идей, повышении качества обучения сотрудников, что является шагами к повышению конкурентоспособности организации.

Литература

1. Итоги года для российского рынка КМ-систем // Tadviser: [сайт]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 17.09.2025).
2. Обзор ведущих систем управления знаниями России 2023 года от PLUS-CONSULTING // PLUS-CONSULTING: [сайт]. – URL: <https://plusworld.ru/articles/56963/> (дата обращения: 17.09.2025).
3. Рейтинг систем управления знаниями // Ruward: [сайт]. – URL: <https://ruward.ru/mix/knowledge->

management-system-rating-2023/ (дата обращения: 18.09.2025).

4. Naumen KMS – корпоративная база знаний в единой среде с AI-помощником // Tadviser: [сайт]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 18.09.2025).

5. ОДК внедрила систему управления знаниями на базе отечественного решения VK Tech // Объединенная

двигателестроительная корпорация: [сайт]. – URL: <https://www.uecrus.com/press> (дата обращения: 19.09.2025).

6. Топ 5 технологических трендов в управлении знаниями // Level 2 University: [сайт]. – URL: <https://l2u.ru/tpost/gsulbire11-top-tehnologicheskikh-trendov-v-upravle> (дата обращения: 19.09.2025).

УДК 681.2.08

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Лужинская А. И., Кисляков Н. Н., Гомма М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается проблема автоматизации процесса программирования координатно-измерительных машин (КИМ). Традиционный подход, основанный на ручном задании измерительных точек и путей, является трудоемким, субъективным и зачастую неоптимальным. Предложено применение методов машинного обучения, в частности обучения с подкреплением и генетических алгоритмов, для адаптивного планирования измерительного пути. Целью исследования является разработка алгоритма, который на основе CAD-модели детали и геометрических допусков автоматически генерирует оптимальную измерительную стратегию, минимизирующую время контроля и погрешность измерения. В работе формализована задача многокритериальной оптимизации, выявлены ключевые проблемы, такие как вычислительная сложность и моделирование погрешностей, и предложены пути их решения. Ожидаемым результатом является программный модуль, интегрируемый в существующее ПО КИМ, который позволит значительно сократить время программирования и повысить эффективность контроля.

Ключевые слова: координатно-измерительная машина (КИМ), машинное обучение, обучение с подкреплением, автоматизация, CAD/CAM.

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE MEASUREMENT PATH PLANNING ALGORITHMS BASED ON MACHINE LEARNING

Luzhinskaya A. I., Kislyakov N. N., Homma M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article addresses the problem of automating the programming process of coordinate measuring machines (CMMs). The traditional approach, based on manual assignment of measurement points and paths, is labor-intensive, subjective, and often suboptimal. The application of machine learning methods, specifically reinforcement learning and genetic algorithms, for adaptive measurement path planning is proposed. The aim of the research is to develop an algorithm that, based on the CAD model of a part and its geometric tolerances, automatically generates an optimal measurement strategy that minimizes inspection time and measurement error. The paper formalizes the problem of multi-criteria optimization, identifies key challenges such as computational complexity and error modeling, and proposes solutions. The expected result is a software module integrable into existing CMM software, which will significantly reduce programming time and improve inspection efficiency.

Keywords: coordinate measuring machine (CMM), machine learning, reinforcement learning, automation, CAD/CAM.

*Адрес для переписки: Лужинская А. И., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: alex.andriya.l.y@gmail.com*

Современное производство характеризуется тенденцией к повышению сложности геометрии изделий и ужесточением требований к их качеству. В этих условиях координатно-измерительные машины (КИМ) стали неотъемлемым звеном технологического процесса. Однако рост производительности самих КИМ опережает развитие методов их программирования. Традиционное программирование КИМ – это рутинный и трудоемкий процесс. Инженер-программист вручную задает точки касания или путь сканирования на виртуальной модели детали [1]. Это требует высокой квалификации, занимает много времени и не всегда является оптимальным с точки зрения минимизации времени измерения или погрешности.

Данный подход обладает рядом недостатков:

1. Субъективность: Два инженера создадут две разные программы с разной эффективностью.
2. Время: Процесс может занимать часы.
3. Неоптимальность: Ручной путь редко является оптимальным по времени, точности или покрытию.
4. Невозможность адаптации: если деталь установлена со смещением, программа может не сработать или упереться в нее.

Цель исследования: разработать алгоритм, который автоматически, оптимально и адаптивно генерирует измерительный путь, минимизируя время и погрешность, исходя из CAD-модели и целей контроля.

Ключевые этапы разработки алгоритма:

Этап 1: Анализ CAD-модели и целей измерения. Алгоритм должен "понять", что и с какой точностью нужно измерить, то есть должно быть автоматическое определение типов поверхностей: плоскости, цилиндры, сферы, идентификация конструктивных элементов: отверстия, пазы, фаски, уступы, анализ геометрических допусков [2].

Итог этого этапа: Список измерительных признаков с приоритетами и требованиями к точности.

Этап 2: Формализация задачи оптимизации.

Нужно определить математическую постановку задачи. Это многокритериальная задача оптимизации.

Целевые функции:

1. Общее время измерения (Т):

2. Суммарная погрешность измерения (Е): учесть факторы, влияющие на точность: динамические погрешности на высоких скоростях, температурный дрейф, ошибки кинематики.

3. Риск столкновения (R): Вероятность касания шупом детали или оснастки в нерасчетной точке.

Задача алгоритма: найти такой путь Р (последовательность точек и траекторий), который дает наилучший компромисс между Т, Е и R.

Этап 3: Выбор и применение методов машинного обучения и оптимизации.

Это ядро исследования. Можно использовать несколько подходов:

а) обучение с подкреплением. Это наиболее перспективный подход. Система (агент) взаимодействует со средой (виртуальная модель КИМ и детали). Ее действия – это выбор следующей точки измерения. Награда выдается за быстрый и точный охват всех критических элементов. После множества итераций на виртуальных моделях алгоритм учит оптимальную стратегию;

б) генетические алгоритмы: можно использовать для глобальной оптимизации измерительного пути. «Особь» в популяции – это различные последовательности точек. «Приспособленность» особи оценивается по времени и прогнозируемой погрешности. Скрещивание и мутация позволяют найти достаточно хорошее решение сложной задачи комбинаторной оптимизации.

Однако данный алгоритм обладает рядом сложностей:

1. Вычислительная сложность: Перебор всех вариантов путей для сложной детали практически неосуществим (это NP-трудная задача «коммивояжера» в 3D). Алгоритмы должны быть эффективными.

2. Моделирование погрешности: чтобы минимизировать Е, алгоритм должен иметь точную математическую модель всех источников погрешности КИМ (кинематическая модель, модель динамических погрешностей). Создание такой модели – отдельная сложная задача [3].

3. Данные для обучения: для обучения с подкреплением нужны огромные размеченные данные. Их получение на реальной КИМ займет годы. Поэтому ключевую роль играет достоверное виртуальное моделирование [4].

В работе обоснована необходимость и перспективность применения методов машинного обучения для автоматизации планирования измерительных путей для КИМ. Предложена трехэтапная методология разработки соответствующего алгоритма, начиная от анализа CAD-модели и заканчивая применением RL и GA для оптимизации.

Ожидаемый результат: Программный модуль или плагин для существующего ПО КИМ, который значительно (на 30–50 %) сокращает время программирования и повышает эффективность контроля.

Литература

1. Вайсбурд, Э. М. Автоматизация контроля размеров сложнопрофильных деталей / Э. М. Вайсбурд, А. А. Глазунов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 45–52.
2. Теверовский, Л. В. Интеллектуальные системы управления измерением на КИМ / Л. В. Теверовский // Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 112–120.
3. Жуков, В. А. Методы планирования измерительных путей для координатно-измерительных машин / В. А. Жуков, К. С. Иванов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 123–131.
4. Косов, М. Г. Цифровые двойники в метрологическом обеспечении производства: современное состояние и перспективы / М. Г. Косов, И. В. Петров // Измерительная техника. – 2021. – № 3. – С. 12–18.

УДК 005.915.2

МЕТОД АЛЬТЕРНАТИВ ДЛЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК: ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Лужинская А. И., Серенков П. С., Романчук В. М.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается проблема применения метода альтернатив в условиях экспертного оценивания. Выявлена ключевая трудность, связанная с психологической сложностью для экспертов количественного определения степени преимущества одной альтернативы над другой. Предложены и проанализированы два практических подхода, направленных на преодоление данной проблемы за счет визуализации процесса оценки и использования процедуры предварительного ранжирования. Показано, что предлагаемые методы позволяют снизить когнитивную нагрузку на экспертов и повысить надежность коллективных оценок.

Ключевые слова: метод альтернатив, экспертное оценивание, психология оценок, ранжирование, шкалирование.

THE METHOD OF ALTERNATIVES FOR EXPERT ASSESSMENTS: PRACTICAL ASPECTS OF APPLICATION

Luzhinskaya A. I., Serenkov P. S., Romanchak V. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article discusses the problem of applying the method of alternatives in the context of expert evaluation. A key difficulty has been identified, related to the psychological challenge for experts in quantitatively determining the degree of advantage of one alternative over another. Two practical approaches aimed at overcoming this problem through visualization of the assessment process and the use of a preliminary ranking procedure are proposed and analyzed. It is shown that the proposed methods can reduce the cognitive load on experts and increase the reliability of collective assessments.

Keywords: method of alternatives, expert evaluation, psychology of assessments, ranking, scaling.

Адрес для переписки: Лужинская А. И., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: alex.andriya.l.y@gmail.com

Метод альтернатив для экспертных оценок – это уже не просто общепринятая техника принятия решений, а формализованная процедура, используемая для анализа сложных, часто неструктурированных проблем, где требуется мнение нескольких специалистов.

Его основная цель – выработать согласованное, коллективное экспертное мнение по поводу сравнительной предпочтительности различных альтернатив и представить его в количественном виде, как минимум, в шкале интервалов с проверкой статистической согласованности экспертов [1].

Практическое применение метода выявило существенную проблему: экспертам оказывается сложно вербализовать и количественно определить, насколько один вариант превосходит другой. Человеческий мозг хорошо работает с категориями: «лучше/хуже», «нравится/не нравится», «приемлемо/неприемлемо». Но определить уверенно разницу в предпочтительности в количественной шкале или даже в вербальной шкале сравнений – эксперту сложно, так как это область абстрактного мышления. Исследования показывают, что более чувствительно и уверенно эксперт распознает объекты, задействуя органы чувств. Этими вопросами занимается органолептика.

Чувствительность зрения, а именно его способность к различению оттенков, контрастов, пропорций и пространственного положения объектов, позволяет эксперту проводить оценки более интуитивно и с меньшей когнитивной нагрузкой по сравнению с вербализацией или абстрактным числовым шкалированием. Графическое представление данных, по сути, трансформирует сложную задачу количественного сравнения в более простую и естественную для человека задачу визуального позиционирования и соотнесения. Это напрямую соотносится с принципами сенсорного анализа, где визуальные шкалы и эталоны используются для объективизации субъективных ощущений [2].

В докладе предлагаются подход, направленный на совершенствование процесса получения первичной информации эксперта за счет снижения субъективной нагрузки на эксперта. В основу этих подходов положена гипотеза Э. Деминга: «графическое представление процесса на порядок

повышает возможность его анализа и совершенствования» [3].

Подход предполагает реализацию метода альтернатив в графическом виде с применением простого программного обеспечения.

Реализация плана А: сравнение объектов по принципу «каждый последующий с предыдущим». Все множество оцениваемых объектов эксперт ранжирует по степени предпочтительности.

Эксперту предъявляется графическая шкала сравнений объектов (рисунок 1), на которой он фиксирует меткой положение наименее предпочтительного объекта (альтернативы). Далее он определяет меткой на шкале место второго объекта (рисунок 2), то есть визуально оценивает степень различия между ними. Затем аналогичным образом второй объект сравнивается с третьим и так далее. Специализированное программное обеспечение позволяет преобразовать графическое расположение в количественные значения и автоматически рассчитать итоговые различия по методу альтернатив.



Рисунок 1 – Исходная шкала с фиксированным объектом



Рисунок 2 – Визуальная оценка положения второго объекта относительно первого

Реализация плана Б: сравнение объектов по принципу «каждый с одним». Из ранжированного ряда объектов выбираются два: наименее предпочтительный (первый по рангу) и наиболее предпочтительный (N -ный по рангу).

Эксперту предъявляется графическая ось, на которой он фиксирует метками положения первого по рангу и N -ного по рангу объектов (рисунок 3). Метки выступают в качестве реперных точек, формирующих границы шкалы. Далее он (эксперт) определяет меткой на сформированной шкале место второго объекта, встраивая его в область между первым и N -ным объектами, то есть визуально оценивает степень различия как между ним и первым, так и между ним и N -ным.

Программное обеспечение последовательно представляет «картинки» со сформированной двухреперной шкалой, на которой эксперт последовательно оценивает степень предпочтительности всех объектов, располагая каждый раз метку в соответствии со степенью предпочтительности относительно границ шкалы – реперных точек (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оценка объекта относительно фиксированных границ «наилучший/наихудший»

Реализация плана Б позволяет абстрагироваться от абсолютных числовых значений и работать исключительно в рамках относительных сравнений, что психологически облегчает работу эксперта и повышает согласованность его оценок.

Представленный подход позволяет нивелировать ключевой недостаток традиционного метода альтернатив, связанный с трудностью количественной оценки степеней предпочтения. Второй подход, в частности, является наиболее перспективным, так как он максимально абстрагируется от цифровых шкал, снижает когнитивное напряжение и позволяет эксперту сосредоточиться на относительных, а не абсолютных суждениях.

Проведенный анализ подтверждает, что традиционная процедура экспертного оценивания по методу альтернатив сталкивается с фундаментальной проблемой, обусловленной психофизиологическими ограничениями человеческого восприятия. Предложенные модификации метода – графическая визуализация и предварительное ранжирование с выделением реперных точек – направлены на формализацию и упрощение процесса вынесения экспертных суждений. Их внедрение позволяет: снизить когнитивную нагрузку на экспертов; уменьшить субъективный разброс в оценках; повысить надежность, достоверность и воспроизводимость результатов группового экспертного оценивания.

Наиболее эффективным признан подход, основанный на предварительном ранжировании и оценке относительно крайних альтернатив, так как он в наибольшей степени соответствует естественным механизмам сравнительной оценки человека. Перспективой дальнейших исследований является разработка программного обеспечения, автоматизирующего описанные процедуры, и проведение апробации на реальных задачах принятия решений.

Литература

1. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
2. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг. – М.: Альпина Паблишер, 2007. – 400 с.
3. Егоров, З. Е. Применение международных требований в области сенсорного анализа при подготовке инженеров по сертификации и повышению квалификации специалистов пищевых предприятий / З. Е. Егоров // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 2. – С. 345–354.

УДК 658.562.012.7

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ ФАСОВАННЫХ ТОВАРОВ

Митюшина Ю. С., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Одним из способов обеспечения качества фасованной продукции является проведение статистического приемочного контроля. В результате анализа стандартов на методы контроля фасованных товаров установлено, что существующие подходы к определению количества фасованного товара построены на планах статистического приемочного контроля, которые учитывают ограничение на риск потребителя. Обоснована необходимость организации рационального статистического контроля фасованного товара у изготовителей (упаковщиков, поставщиков) фасованной продукции. В основу разработки положена концепция согласованности риска поставщика и потребителя. Поставлены задачи для достижения цели.

Ключевые слова: фасованные товары, статистический приемочный контроль, риск поставщика и потребителя, планы контроля.

DEVELOPMENT STRATEGY FOR STATISTICAL ACCEPTANCE INSPECTION OF PREPACKAGED GOODS

Mitsiushyna Y. S., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. One of the ways to ensure the quality of prepackaged products is to conduct statistical acceptance inspection. An analysis of standards for methods of control of prepackaged goods has shown that existing approaches

to determining the quantity of prepackaged items are based on statistical acceptance sampling plans that account for limits on consumer risk. The need to establish a rational statistical inspection system for prepackaged goods at the manufacturers' (packers' and suppliers') facilities has been substantiated. The development is founded on the concept of aligning supplier and consumer risk. Specific tasks have been formulated to achieve this objective.

Keywords: packaged goods, statistical acceptance inspection, supplier and consumer risk, sampling plans.

Адрес для переписки: Серенков П. С., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

В условиях стремительного развития торговли иистики фасованные товары стали неотъемлемой частью современной жизни. От продуктов питания и бытовой химии до косметики и медикаментов – сегодня практически каждая категория потребительских товаров представлена в расфасованном виде. Это обеспечивает удобство хранения, транспортировки и использования.

В связи с широкой распространенностью фасованных товаров и их значением для потребителей, особую актуальность приобретает вопрос обеспечения их качества. Для защиты интересов граждан и поддержания добросовестной конкуренции на рынке, государственным регулятором разработаны и внедрены обязательные для соблюдения требования к фасованной продукции. Такие требования устанавливаются в отношении содержимого упаковочной единицы и для партии фасованного товара и охватывают ключевые аспекты от точности указания номинального количества продукта до требований к упаковке и маркировке.

Наличие требований предусматривает необходимость эффективного контроля – как со стороны изготовителей, так и со стороны контролирующих органов. Четко выстроенный контроль фасованных товаров играет ключевую роль в обеспечении достоверности информации, представленной на упаковке.

Одним из способов обеспечения качества фасованной продукции является проведение статистического приемочного контроля. Основой организации статистического приемочного контроля является его план, включающий в себя:

- правила и порядок формирования выборок определенных размеров одноступенчатых, многоступенчатых и последовательных процедур;
- правила обработки данных контроля и принятия решений по результатам контроля выборок.

Планы контроля характеризуются рисками потребителя, поставщика или соответствующими уровнями доверия. Риски потребителя и поставщика являются характеристиками достоверности решений, принимаемых по результатам статистического приемочного контроля. Указанные характеристики определяют вероятности верных и ошибочных решений, принимаемых по результатам контроля.

Выбор схем и планов статистического приемочного контроля должен осуществляться с учетом требований к их достоверности. Указанные требования могут быть заданы посредством ограничения уровня риска, допустимого для потребителя при контроле продукции поставщиком

(в форме нормированного значения риска потребителя β_0), либо ограничения риска, допустимого для поставщика при контроле продукции потребителем (в форме нормированного значения риска поставщика α_0).

Принципы выбора планов статистического приемочного контроля представлены на рисунке 1, демонстрирующем операционные характеристики различных схем контроля.

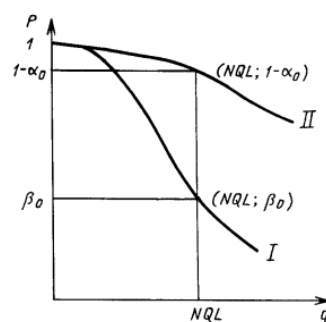


Рисунок 1 – Оперативные характеристики допустимых планов контроля

Допустимые для поставщика планы определяются как те, чьи операционные характеристики не превышают уровень, соответствующий точке с координатами (NQL; β_0). Аналогично, приемлемые для потребителя планы характеризуются операционными кривыми, проходящими не ниже точки с координатами [NQL; (1 - α_0)].

Одним из ключевых параметров, определяющим выбор схем и планов приемочного контроля, выступают приемлемый уровень качества (AQL).

Под приемлемым уровнем качества понимается уровень качества, который является границей удовлетворительного среднего уровня качества процесса. Он определяется таким уровнем несоответствий, который считается допустимым при принятии решения о приемке партии. Для конкретного плана контроля данный уровень соответствует высокой вероятности приемки партии продукции. Приемлемый уровень качества представляет исходное значение уровня несоответствий, на которое согласны поставщик и потребитель и которое может служить основой для выбора планов контроля.

AQL служит показателем строгости выборочного контроля: снижение значения AQL приводит к ужесточению контроля. В связи с этим выбор соответствующего значения AQL представляет собой ключевой этап при применении статистических методов приемочного контроля.

Конкретные схемы и планы статистического приемочного контроля, применяемые к определенным видам продукции, группам показателей или отдельным показателям качества, подлежат включению в программы – методики (методы) измерений, которые могут быть изложены в технических условиях, государственных стандартах и других руководящих документах.

В результате анализа стандартов на методы контроля фасованных товаров установлено, что существующие подходы к определению количества фасованного товара построены на планах статистического приемочного контроля, которые учитывают ограничение на риск потребителя. В то же время, для изготовителей (упаковщиков, поставщиков) фасованной продукции отсутствуют методики (методы) измерений, учитывающие ограничения на риск поставщика при проведении статистического приемочного контроля, а также возможности переключения на планы различной жесткости, которым соответствуют различные риски.

Таким образом, изготовители (упаковщики, поставщики) фасованной продукции имеют возможность выбора альтернативного подхода к определению количества фасованного товара, который может являться для них наиболее выгодным с экономической точки зрения.

Вывод. Для организации рационального статистического контроля фасованного товара у изготовителей (упаковщиков, поставщиков) фасованной

продукции необходима разработка комплекса методов (методик) измерений, основанных на согласованности риска поставщика и потребителя.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать существующие подходы и планы статистического приемочного контроля;
- проанализировать и систематизировать особенности проведения определения количества фасованного товара;
- обосновать критерии выбора видов планов статистического приемочного контроля фасованных товаров;
- сформировать комплекс рациональных планов статистического приемочного контроля фасованного товара, соответствующих выбранным критериям.

Литература

1. Бородачев, С. М. Статистические методы в управлении качеством: учеб. пособие / С. М. Бородачев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 87 с.
2. ГОСТ ISO 2859-1-2009. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества. – Введ. 01.07.2010. – Мн.: Госстандарт, 2010. – 105 с.
3. ГОСТ Р 50779.30-95. Статистические методы. Приемочный контроль качества. Общие требования. – Введ. 01.07.1996. – М.: Стандартинформ, 2004. – 28 с.

УДК 65.012.8

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АЛЬТЕРНАТИВ

Лужинская А. И., Серенков П. С., Романчук В. М.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются методологические проблемы традиционных квалиметрических моделей, связанные с субъективностью экспертных оценок. Предлагается использование метода альтернатив и дифференцированного подхода к оценке свойств различного типа. Разработанный подход позволяет снизить субъективность балльных оценок и весовых коэффициентов, повысить надежность и воспроизводимость результатов квалиметрического анализа. Приводятся практические рекомендации по реализации предложенной методики для оценки сложных технических объектов.

Ключевые слова: квалиметрическая модель, метод альтернатив, экспертные оценки, субъективность, весовые коэффициенты.

IMPROVING THE QUALIMETRIC MODEL BASED ON THE METHOD OF ALTERNATIVES

Luzhinskaya A. I., Serenkov P. S., Romanchuk V. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper discusses methodological problems of traditional qualimetric models associated with the subjectivity of expert evaluations. The use of the method of alternatives and a differentiated approach to the evaluation of different types of properties is proposed. The developed approach makes it possible to reduce the subjectivity of score ratings and weight coefficients, and increase the reliability and reproducibility of the results of qualimetric analysis. Practical recommendations for the implementation of the proposed methodology for the evaluation of complex technical objects are provided.

Keywords: qualimetric model, method of alternatives, expert evaluations, subjectivity, weight coefficients.

*Адрес для переписки: Лужинская А. И., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь
e-mail: alex.andriya.l.y@gmail.com*

Квалиметрическая модель, представляющая собой иерархическую структуру свойств с алгоритмом свертки частных показателей в интегральный индекс, утвердилась в качестве стандартного инструмента оценки качества сложных объектов. Ее основное преимущество усматривается в способности заменить интуитивные представления о качестве формализованными, математически обоснованными расчетами. Однако за видимой строгостью алгоритма скрываются серьезные методологические проблемы, которые ставят под вопрос объективность и онтологический статус получаемых результатов.

На пути к интегральному показателю качества исследователь сталкивается с двумя типами субъективных решений:

1. Субъективность балльных оценок. Перевод характеристик объекта в числовую шкалу часто основывается на экспертных суждениях. Даже технические параметры (например, производительность или энергоэффективность) требуют принятия решения о виде функции перевода (линейная, логарифмическая) в баллы. Для нематериальных свойств (дизайн, удобство) проблема усугубляется, так как балл отражает личное восприятие эксперта.

2. Субъективность весовых коэффициентов. Веса, отражающие относительную важность свойств, не являются объективной данностью. Они определяются ценностными представлениями: для одной группы пользователей критически важен один параметр, для другой – иной. Назначение весов – это не вычисление, а нормативное решение, основанное на целях оценки или мнении конкретных стейкхолдеров.

Итоговый рассчитанный показатель качества, несмотря на внешнюю точность, является произведением этих двух субъективных величин. Это создает риски манипуляций и снижает доверие к результатам.

В докладе предлагается использовать следующие методы повышения достоверности квалиметрической модели:

1. Использование метода альтернатив для определения коэффициентов весомости. Метод альтернатив – сравнительный подход к квалиметрическому оцениванию, при котором свойства объекта измеряются не в абсолютных баллах, а относительно свойств других объектов (альтернатив) из той же выборки. Данный метод позволяет существенно снизить субъективность классической квалиметрической процедуры и повысить надежность ее результатов.

Основная идея метода заключается в том, что объекты оцениваются не изолированно, а только в сравнении друг с другом по каждому критерию. Оценка i -го объекта по j -му свойству выставляется не в абсолютной шкале, а относительно свойств других объектов из сравниваемой группы.

Данный подход позволяет напрямую решить проблемы абсолютного подхода:

1.1. Снижение субъективности балльных оценок. Эксперту психологически проще и точнее ответить на вопрос: «Насколько модель А производительнее модели Б?», чем абстрактно оценить «производительность модели А в 8 баллов». Сравнительное суждение более естественно и надежно.

1.2. Автоматическая калибровка шкалы. Оценочная шкала формируется не абстрактно, а на основе конкретной выборки альтернатив. «Лучший» в выборке объект по каждому критерию получает максимальную относительную оценку, «худший» – минимальную. Это делает шкалу адекватной и понятной в рамках конкретной задачи.

1.3. Повышение обоснованности весовых коэффициентов. Метод альтернатив часто комбинируется с методом парных сравнений для назначения весов. Эксперт сравнивает критерии между собой, что также является более простой и надежной процедурой, чем прямое назначение весов. Рассчитанные веса лучше отражают реальные предпочтения.

1.4. Повышение устойчивости результатов. Поскольку все оценки относительны и вычислены на основе согласованных матриц сравнений, итоговый рейтинг альтернатив менее чувствителен к небольшим изменениям в исходных данных. Результаты становятся более надежными и воспроизводимыми.

2. Для оценки свойств использовать разные подходы в зависимости от типа свойства:

А) Свойство x_i элемента задано в дискретном виде. Для задания требований к уровню приемлемости свойства проектируемого элемента x_i будет использоваться 11 – балльная шкала $[0, \dots, 10]$:

$R = 0$ – минимальная предпочтительность (рейтинг) разработчика в отношении значения свойства x_i .

$R = 10$ – максимальная предпочтительность (рейтинг) разработчика в отношении значения свойства x_i .

Значения нормируются в диапазоне $x_{ij} = R_{ij} / 10$

Б) Свойство x_i элемента задано в непрерывном виде.

В зависимости от условий задания требований (единственное значение, интервал, наличие оптимального значения) используется один из четырех вариантов кодирования ситуаций. Для каждого варианта определяется рейтинг предложения, который затем нормируется [1].

Предложенный в работе подход на основе метода альтернатив позволяет существенно снизить субъективность традиционных квалиметрических оценок. Переход от абсолютных оценок к сравнительным, а также дифференцированная обработка свойств различного типа обеспечивают более высокую надежность и воспроизводимость результатов. Комплексное использование метода парных сравнений, нормализации оценок и статистической проверки согласованности мнений экспертов создает методологическую основу

для объективного выбора элементов сложных технических систем.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой программного обеспечения, реализующего предложенный алгоритм, а также с адаптацией метода для различных классов технических объектов с учетом их специфических особенностей.

УДК 681.785.64:535.317

КАЛИБРОВКА НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Панько В. В.¹, Соколовский С. С.²

¹Белорусский государственный институт метрологии

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. В докладе представлена методика и описано инструментальное обеспечение калибровки национального эталона единицы напряженности магнитного поля, приведена аналитическая модель определения относительной погрешности воспроизведения единицы напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: напряженность магнитного поля, воспроизведение единицы, эталон, калибровка.

CALIBRATION OF THE NATIONAL STANDARD OF THE UNIT OF MAGNETIC FIELD STRENGTH

Panko V. V.¹, Sokolovsky S. S.²

¹Belarusian State Institute of Metrology

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The report presents the methodology and describes the instrumental support for calibrating the national standard of the unit of magnetic field strength, and provides an analytical model for determining the relative error in reproducing the unit of magnetic field strength.

Keywords: magnetic field strength, unit reproduction, standard, calibration.

Адрес для переписки: Панько В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pankovladavl@gmail.com

В 2025 году с целью расширения функциональных метрологических возможностей в рамках программы «Эталоны Беларуси» был модернизирован Национальный эталон единицы напряженности магнитного поля НЭ РБ 59-20.

Эталон обеспечивает потребность метрологической оценки средств измерений напряженности магнитного поля, измерителей напряженности электромагнитного поля, в том числе измерительных антенн.

Принцип действия эталона основан на возбуждении однородного магнитного поля в пространстве между катушками полеобразующей системы на основе колец Гельмгольца, входящей в состав излучающего блока [1].

Контроль уровня воспроизводимого эталоном магнитного поля осуществляется путем измерения измерителем величины среднеквадратического значения тока, протекающего через кольца Гельмгольца, и умножения ее на коэффициент преобразования колец Гельмгольца. Использование такого способа контроля уровня воспроизводимого поля основано на том физическом факте, что для колец Гельмгольца с определенными геометрическими характеристиками уровень формируемого в пространстве между ними магнитного

поля однозначно связан с величиной протекающего через эти катушки тока, т. е.:

$$H=K \cdot I, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля в А/м; K – коэффициент преобразования КГ в 1/м; I – ток, протекающий через катушки КГ в А.

Величина напряженности воспроизводимого эталонным оборудованием магнитного поля определяется током, протекающим через катушки колец Гельмгольца, который создает блок генерации [2]. Предложенный метод калибровки основан на сравнении показаний компаратора магнитного поля (далее – компаратор), полученных на эталоне, со значениями компаратора, указанными в сертификате калибровки ФГУП «ВНИИФТРИ».

При проведении калибровки эталона применяют компараторы магнитного поля ПЗ-61ПМ/2, ПЗ-61ПМ/1. Данный тип компараторов магнитного поля предназначен для поверки и калибровки эталонов напряженности магнитного поля методом сравнения результатов их градуировки на испытуемом эталоне и на аппаратуре государственного эталона напряженности магнитного поля.

В состав компаратора магнитного поля входит:

- измерительный преобразователь;
- блок индикации;

Литература

1. Серенков, П. С. Концепция экспертной системы поддержки принятия решений при проектировании компонентов сложных технических объектов / П. С. Серенков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси. – 2024. – Вып. 13. – С. 367–370.

– кабель соединительный.

Принцип действия компаратора заключается в преобразовании при помощи антенны (измерительный преобразователь) энергии измеряемого переменного магнитного поля (магнитной индукции) в напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля (магнитной индукции), а затем в цифровой код, содержащий информацию о среднеквадратическом значении измеряемого магнитного поля, с отображением результата измерения на жидкокристаллическом индикаторе блока индикации.



Рисунок 1 – Расположение антенны компаратора в полеобразующей системе эталона

При проведении калибровки антенну компаратора устанавливают на держателе в рабочей зоне колец Гельмгольца излучающего устройства эталона (далее – полеобразующая система). При этом центр приемной части антенны должен совпасть с центром рабочей зоны полеобразующей системы эталона. Измерительная ось антенны, проходящая через центр полеобразующей системы эталона, должна быть параллельна вектору напряженности магнитного поля (см. рисунок 1).

После установки антенны производят настройку компаратора магнитного поля в соответствии с руководством по эксплуатации.

Частоту и напряжение излучающего блока эталона необходимо установить таким образом, чтобы его показания в точках калибровки соответствовали значениям напряженности магнитного поля H_y , А/м, указанным в сертификате калибровки.

При проведении измерений фиксируют показания компаратора $H_{к+}$, А/м, в исходном положении, а также после поворота антенны компаратора на 180° вокруг своей оси $H_{к-}$, А/м.

Для получения достоверных результатов при калибровке необходимо выполнить не менее пяти наблюдений в каждой точке калибровки.

Среднее значение показаний компаратора H_k , А/м, определяется по формуле:

$$H_k = \frac{H_{к+} + H_{к-}}{2}, \quad (2)$$

Значение напряженности магнитного поля, воспроизводимого установкой, $H_{yэ}$, А/м, находят при этом, пользуясь формулой:

$$H_{yэ} = \frac{H_э \cdot H_k}{H_{кэ}}, \quad (3)$$

где $H_э$ – значение напряженности магнитного поля из свидетельства о калибровке установки, А/м; H_k – среднее значение показаний компаратора, А/м; $H_{кэ}$ – значение показаний компаратора из сертификата калибровки установки, А/м.

Относительная погрешность воспроизведения напряженности магнитного поля δ_n , %, находится по формуле:

$$\delta_n = 100 \cdot \frac{(H_y - H_{yэ})}{H_{yэ}}, \quad (4)$$

где H_y – значение напряженности магнитного поля, установленное на блоке управления эталона, А/м; $H_{yэ}$ – значение напряженности магнитного поля, рассчитанное по формуле (2).

Модель определения относительной погрешности воспроизведения единицы напряженности магнитного поля

$$\delta_n = 100 \cdot \left(\frac{H_y \cdot H_{кэ}}{H_э \cdot H_k} - 1 \right) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 \quad (5)$$

где H_y – значение напряженности магнитного поля, установленное на блоке управления компаратора, А/м; $H_{кэ}$ – значение показаний компаратора из сертификата калибровки компаратора, А/м; $H_э$ – эталонное значение напряженности магнитного поля из сертификата калибровки компаратора, А/м; H_k – измеренное компаратором значение напряженности магнитного поля, А/м; δ_1 – поправка на дискретность отображения показаний блока управления, %; δ_2 – поправка на неопределенность измерений, вызванную взаимодействием компаратора с полеобразующей системой эталона, %; δ_3 – поправка на неопределенность измерений, вызванную неточностью установки антенны компаратора в центр рабочей зоны полеобразующей системы эталона, %; δ_4 – неопределенность измерений коэффициента преобразования компаратора на государственных эталонах Российской Федерации, из сертификата калибровки компаратора, %; δ_5 – поправка на дискретность показаний компаратора, %.

Литература

1. Панько, В. В. Анализ современного состояния и перспективы развития системы обеспечения метрологической прослеживаемости в области измерений напряженности магнитного поля / В. В. Панько, О. А. Волынец, С. С. Соколовский // Приборостроение-2024: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–29 нояб. 2024 г. / редкол.: А. И. Свистун (пред.). – Мн.: Интегралполиграф, 2024. – С. 165–166.
2. Страхов, А. Ф. Автоматизированные антенные измерения / А. Ф. Страхов. – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с.

УДК 338.24

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО МЕНЕДЖМЕНТА В СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЙ

Пряник И., Давыдова Е. А., Чуешков В. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В Республике Беларусь внедрение бережливого производства является важным направлением для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий. Указ Президента Республики Беларусь от 17 января 2025 г. № 31 подчеркивает необходимость развития систем бережливого менеджмента как одного из приоритетов государственной политики в области экономического развития. В статье обсуждаются проблемы интеграции системы бережливого менеджмента и действующих систем менеджмента на предприятиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: системы менеджмента, бережливый менеджмент, интеграция.

INTEGRATION OF THE SAVE MANAGEMENT SYSTEM IN ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEMS

Pryanik I., Davidova E. A., Chueshkov V. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. In the Republic of Belarus, the implementation of lean production is an important area for improving the efficiency and competitiveness of enterprises. Presidential Decree No. 31 of January 17, 2025, emphasizes the need to develop lean management systems as a priority of the state policy for economic development. This article discusses the challenges of integrating lean management systems with existing management systems at enterprises in the Republic of Belarus.

Keywords: management systems, lean management, integration.

*Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by*

В 2025 году в Беларуси начинается пятилетка качества, целью которой является дальнейшее повышение уровня жизни населения и конкурентоспособности экономики. В рамках этой инициативы планируется внедрение современных систем управления производством и продажами, что создаст дополнительные возможности для применения принципов бережливого менеджмента.

Внедрение бережливого производства в Республике Беларусь является важным направлением для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий. Это связано с необходимостью оптимизации бизнес – процессов, снижения затрат и улучшения качества продукции. Указ Президента Республики Беларусь от 17 января 2025 г. № 31 [1] подчеркивает необходимость развития систем бережливого менеджмента как одного из приоритетов государственной политики в области экономического развития. В документе акцентируется внимание на важности подготовки квалифицированных кадров, способных эффективно внедрять и поддерживать данные системы. Это свидетельствует о том, что государство признает необходимость создания условий для повышения конкурентоспособности белорусских предприятий через оптимизацию процессов и внедрение современных управленческих подходов.

Во исполнение Указа Президента Республики Беларусь Постановлением Госстандарта от 15 апреля 2025 г. № 49 принят и введен в действие с 16 апреля 2025 г.

СТБ 2672-2025 «Менеджмент качества. Системы бережливого менеджмента. Требования и руководство по применению» [2].

Документ разработан в рамках реализации дорожной карты мероприятий по внедрению принципов бережливого производства, утвержденной Советом Министров Республики Беларусь [3].

Данный стандарт по праву можно назвать инновационной разработкой, поскольку при его подготовке были проанализированы многочисленные международные документы, практики различных стран, а также опыт отечественных предприятий и органов госуправления.

СТБ 2672-2025 устанавливает требования к системе бережливого менеджмента (СБМ) и руководство по ее применению. Данная система создается для обеспечения поставок потребителю продукции и услуг соответствующего качества, при оптимальных затратах и в необходимое время. Баланс этих характеристик может быть обеспечен с использованием рискориентированного проектно-процессного подхода к системе менеджмента организации и ее цепям поставок. Вследствие этого система бережливого менеджмента не может результативно и эффективно развиваться отдельно от системы менеджмента качества и других систем менеджмента организации. Поэтому СТБ 2672-2025 построен на основе высочайшей структуры стандартов на системы менеджмента, принятой на международном уровне.

СТБ 2672-2025 также позволяет поэтапно совершенствовать систему бережливого менеджмента, предусматривая четыре уровня. Все из них рекомендованы для проведения сертификации независимой стороной, за исключением первого [4].

Принято считать, что инструменты бережливого производства (называемый также LEAN

production) применимы для повышения эффективности бизнес-процессов очень ограниченного количества отраслей, так как концепция берет свое начало с автомобильного производства. Но это не так, данную концепцию можно внедрить абсолютно в любую сферу [6].

Стандарт может использовать любая организация вне зависимости от формы собственности, размера, сферы деятельности. Особую актуальность это приобретает в пищевой промышленности, где эффективность управления ресурсами напрямую влияет на конкурентоспособность и устойчивость предприятия.

Стоит отметить, что этапы внедрения бережливого производства всегда одинаковые, они не зависят от сферы деятельности компании. Но несмотря на данный факт, всегда стоит учитывать особенности бизнес-процессов отдельных отраслей.

Успешное внедрение LEAN-подхода невозможно без опоры на проверенные методики и стандарты. Они служат основой для разработки информационно-методического обеспечения, обеспечивая системность, воспроизводимость и соответствие международным требованиям. Методы и техники, проанализированные в соответствии с направлениями деятельности организаций, и их влияние на целевые показатели качества, затрат и времени, также перечислены в СТБ 2672-2025 [4].

Серьезной мотивацией к внедрению данных систем и способом поощрения на государственном уровне тех организаций, которые добились в этом направлении наибольших результатов, стало учреждение новой специальной награды «Бережливый подход» в рамках конкурса на соискание Премии Правительства Республики Беларусь за достижения в области качества. Ее обладателями могут стать лауреаты этого конкурса, начиная уже с 2025 г.

Премия Правительства Республики Беларусь за достижения в области качества учреждена постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 5 ноября 1998 г.

№ 1705 с целью повышения конкурентоспособности, производимой в Республике Беларусь продукции, выполняемых работ, оказываемых услуг и обеспечения признания достижений в

области качества продукции (работ и услуг). Этим же постановлением утверждены Положение о Премии Правительства Республики Беларусь за достижения в области качества и Положение о Комиссии по присуждению Премии. Так же организации, получившие сертификаты соответствия принципам бережливого менеджмента, смогут рассчитывать на дополнительную государственную поддержку в виде льготного кредитования или других преференций.

Также следует отметить, что для мотивации работ в области развития бережливого менеджмента в Республике Беларусь учреждена новая специальная награда «Бережливый подход» в рамках конкурса на соискание Премии Правительства за достижения в области качества, начиная с 2025 г., и ведется проработка механизмов государственной поддержки предприятий, сертифицировавших данные системы [4].

Литература:

1. О пятилетке качества: Указ Президента № 31 // Национальный правовой Интернет-портал. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32500031> (дата обращения: 20.06.2025).
2. СТБ 2672-2025. Менеджмент качества. Системы бережливого менеджмента. – Введ. 16.04.2025. – Минск: БелГИСС, 2025. – 114 с.
3. Дорожная карта мероприятий по внедрению принципов бережливого производства: утв. Советом Министров Респ. Беларусь 13.12.2024 № 07/225-1252/16160 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=W22437568> (дата обращения: 20.06.2025).
4. В Беларуси принят государственный стандарт на системы бережливого менеджмента // Госстандарт: [сайт]. – URL: <https://www.gosstandart.gov.by/v-belarusi-prinyat-gosudarstvennyy-standart-na-sistemy-berezhlivogo-menedzhmenta/> (дата обращения: 05.05.2025).
5. СТБ ISO 22000-2020. Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в пищевой цепи. – Введ. 01.05.2020. – Минск: БелГИСС, 2020. – 40 с.
6. Татарникова, Л. И. Организация работы с кайдзен-предложениями / Л. И. Татарникова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 11. – С. 316–320.

УДК 351.824

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Сафроненкова В. С., Давыдова Е. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Неразрушающий контроль является критически важным инструментом для обеспечения надежности и безопасности сложных технических систем, таких как атомные электростанции, авиационные конструкции, трубопроводы и другие объекты с высокой степенью отказа. Однако, несмотря на достижения в технологиях, существует ряд актуальных проблем, которые могут снижать эффективность применяемых методов НК. Данный доклад посвящен анализу основных проблем, которые возникают при проведении неразрушающего контроля широко применяемыми методами, а также рассматриваются пути решения проблем для повышения достоверности и объективности контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, актуальные проблемы, применяемые методы, автоматизация, достоверность результатов.

ACTUAL PROBLEMS IN NON-DESTRUCTIVE TESTING OF INDUSTRIAL FACILITIES

Safronenkova V. S., Davydova E. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Non-destructive testing is a critical tool for ensuring the reliability and safety of complex technical systems such as nuclear power plants, aircraft structures, pipelines and other high-failure rate objects. However, despite advances in technology, there are a number of pressing issues that can reduce the effectiveness of NDT methods. This report analyzes the main issues that arise when performing non-destructive testing using commonly used methods, and discusses ways to address the issues to improve the reliability and objectivity of testing.

Keywords: non-destructive testing, actual problems, applied methods, automation, reliability of results.

*Адрес для переписки: Давыдова Е. А., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: davydovaea@bntu.by*

Актуальные проблемы неразрушающего контроля (далее НК) связаны с необходимостью обеспечения высокой достоверности результатов, сложностью интерпретации данных, постоянным развитием нормативной базы и требований к квалификации персонала.

Ключевые аспекты этих проблем:

Ограниченная достоверность и точность методов-ложные срабатывания и пропуски дефектов. Даже широко применяемые методы НК, такие как ультразвуковой и магнитопорошковый, могут давать ложные результаты из-за влияния внешних факторов (шероховатость поверхности, структура материала, температурные воздействия) [1].

Трудности при оценке размеров и характера дефектов. Например, ультразвуковой метод НК часто не позволяет точно определить реальные размеры и ориентацию дефектов, особенно в материалах с крупнозернистой структурой, где происходит сильное затухание и рассеяние сигнала [1].

Влияние состояния поверхности. Для многих методов НК (например, ультразвукового и вихревого контроля) требуется тщательная подготовка поверхности, что увеличивает трудоемкость и стоимость работ [3].

Технические и технологические ограничения. Современные производства предъявляют новые требования к методам НК, для которых не всегда есть готовые решения.

Проблемы автоматизации. Некоторые методы, такие как капиллярный и магнитопорошковый контроль, сложно автоматизировать, что снижает их производительность и увеличивает зависимость от человеческого фактора. Хотя для некоторых методов НК автоматизация все же возможна (вихревой контроль для однородных деталей).

Проблемы доступа к объекту и сложности контроля в труднодоступных местах. В действующих установках (например, трубопроводах, сосудах под давлением) часто физически сложно обеспечить доступ датчиков к контролируемым зонам без остановки производства и разборки.

Также возникают сложности при обследовании сварных соединений на подкладных кольцах и в условиях ограниченного доступа к объекту [2].

Организационные и кадровые проблемы

Квалификация персонала. Проведение НК требует высококвалифицированных специалистов, сертифицированных по уровням II, III. Однако даже сертифицированные специалисты могут допускать ошибки из-за недостаточного опыта или сложности интерпретации результатов [1].

Высокая стоимость при проведении работ по контролю. Некоторые методы НК (например, радиографический с применением цифровых детекторов, ультразвуковой с применением фазированных решеток) требуют дорогостоящего оборудования, что ограничивает их применение на малых и средних предприятиях.

Также некоторые методы требуют сложной подготовки объекта к контролю (например, использование акустико-эмиссионного метода).

Проблемы в применении метода

Отсутствие универсального метода. Ни один из методов НК не может обнаружить все типы дефектов. Например, визуальный контроль обнаруживает только поверхностные дефекты, видимые невооруженным глазом или с помощью оптических приборов. При этом подповерхностные дефекты остаются незамеченными. Ультразвуковой метод эффективен для выявления внутренних дефектов, но менее точен для выявления поверхностных дефектов. В то время как магнитопорошковый метод подходит только для ферромагнитных материалов, глубина обнаружения подповерхностных дефектов ограничена (обычно до 3 мм). Капиллярный контроль обнаруживает исключительно поверхностные дефекты и не применим для пористых материалов и материалов с шероховатой поверхностью [3].

Сложность оценки опасности дефектов. Большинство методов НК фиксируют только геометрические параметры дефектов (размер, форма), но не оценивают их потенциальную опасность в динамике. Исключением является акустико-эмиссионный метод, который регистрирует развивающиеся дефекты, но его применение ограничено из-за необходимости создания нагрузочных условий [1].

Несовершенство нормативной базы. Существующие нормативные документы часто не успевают за развитием технологий, что приводит к противоречиям в методиках и критериях оценки [2].

Проблемы, связанные с условиями эксплуатации.

Влияние окружающей среды. При контроле объектов в условиях эксплуатации (например, магистральных трубопроводов) на результаты влияют погодные условия, температура, влажность и другие внешние факторы [2].

Ограничения при обследовании без остановки производства. Например, контроль объектов, оборудования без остановки технологического процесса может быть затруднен из-за вибраций, шумов и других помех.

Пути решения актуальных проблем при проведении неразрушающего контроля.

Разработка комбинированных методов. Использование нескольких взаимодополняющих методов НК для повышения достоверности результатов [3].

Внедрение автоматизации и цифровизации. Разработка автоматизированных систем контроля с использованием искусственного интеллекта для обработки данных и уменьшения влияния человеческого фактора.

Совершенствование приборной базы. Создание новых средств НК с повышенной чувствительностью и точностью, таких как многоканальные диагностические системы на основе акустической эмиссии [2].

Улучшение подготовки специалистов. Внедрение современных учебных материалов

и тренажеров для обучения и сертификации персонала [1]. Актуализация нормативной базы. Регулярное обновление стандартов и методических указаний с учетом требований международных стандартов и новейших достижений в области НК.

Заключение. Актуальные проблемы при проведении НК различных объектов носят многофакторный характер: они включают технические ограничения методов, человеческий фактор, экономические и экологические аспекты. Решение этих проблем требует комплексного подхода, включающего совместные усилия разработчиков оборудования, специалистов по НК, улучшение подготовки персонала и совершенствование нормативной базы. Развитие технологий и методик проведения НК позволяет постепенно преодолевать возникающие проблемы, повышая надежность и безопасность критически важных объектов.

Литература

1. Методы неразрушающего контроля // NTCExpert: [сайт]. – URL: <https://ntcexpert.ru/> (дата обращения: 20.12.2025).
2. Неразрушающий контроль магистральных трубопроводов // AEGIS: [сайт]. – URL: <https://aegis-rus.com/>.
3. Неразрушающий контроль // Большая российская энциклопедия: [электрон. ресурс]. – URL: <https://bigenc.ru/> (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 620.179.14

АНАЛИЗ ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ И ПОСТРОЕННОГО НА ЕГО ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Сандомирский С. Г.

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Аннотация. Внутренний коэффициент N_i размагничивания обусловлен неоднородностями в структуре материала. Поэтому N_i позволяет достоверно судить о физико-механических свойствах сталей, но сложен для измерения. В докладе определена достижимая точность определения N_i по разработанной формуле, использующей результаты измерения коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения материала. На ее основе предложен параметр H_k для магнитной структуроскопии сталей с низкой погрешностью его определения за счет использования вместо M_r и M_s их отношения $K_r = M_r/M_s$. Показано, что монотонная связь с температурой отпуска среднеуглеродистых легированных сталей и не высокая погрешность определения является физической основой эффективного использования параметра H_k для магнитной структуроскопии. Результаты позволяют при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из таких сталей сосредоточить внимание на повышении точности измерения H_c и K_r материала изделий.

Ключевые слова: магнитный структурный анализ, ферромагнитные материалы, магнитные свойства, внутренний коэффициент размагничивания, погрешности измерения магнитных параметров и алгебраических преобразований.

ANALYSIS OF THE ACHIEVABLE ACCURACY OF DETERMINING THE INTERNAL DEMAGNETIZATION COEFFICIENT OF STEELS BY THEIR MAGNETIC PARAMETERS AND THE ALGORITHM FOR PROCESSING MEASUREMENT RESULTS BUILT ON ITS BASIS

Sandomirski S. G.

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The internal demagnetization coefficient N_i is caused by inhomogeneities in the structure of the material. Therefore, N_i allows one to reliably judge the physical and mechanical properties of steels, but is difficult to measure. The report defines the achievable accuracy of determining N_i using the developed formula, which uses the results of measuring the coercive force H_c , remanent magnetization M_r and saturation magnetization M_s of the

material. On its basis, the parameter H_k is proposed for magnetic structuroscopy of steels with a low error in its determination due to the use of the ratio $K_r = M_r/M_s$ instead of M_r and M_s . It is shown that the monotonic relationship with the tempering temperature of medium-carbon alloy steels and the low error in determination are the physical basis for the effective use of the H_k parameter for magnetic structuroscopy. The results allow us to focus on increasing the accuracy of measuring H_c and K_r of the product material when developing methods and devices for magnetic structuroscopy of products made from such steels.

Keywords: magnetic structural analysis, ferromagnetic materials, magnetic properties, internal demagnetization coefficient, errors in measuring magnetic parameters and algebraic transformations.

Адрес для переписки: Сандомирский С. Г., ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Анализ методов магнитной структуроскопии показал, что тесную связь со структурными и механическими свойствами сталей имеет их внутренний коэффициент N_i размагничивания [1]. Но его непосредственное определение сложно и не производительно. В [2–4] установлена связь N_i ферромагнитного материала с его коэрцитивной силой H_c , намагниченностью M_s технического насыщения и остаточной намагниченностью M_r :

$$N_i = \frac{H_c(1-M_r/M_s)}{M_r}. \quad (1)$$

При этом H_c , M_r и M_s материалов можно измерить по стандартным методикам с низкими относительными погрешностями δ : δ_{H_c} измерения H_c составляет $\pm 2\%$, δ_{M_r} и δ_{M_s} измерения M_r и M_s не превышают $\pm 3\%$, а δ_{K_r} определения отношения $K_r = M_r/M_s$ при измерении M_r и M_s одной и той же аппаратурой не превышает $\pm 1\%$ [5].

Цель доклада – анализ погрешностей определения N_i по формуле (1) и параметра, сформированного на ее основе из H_c и K_r сталей (которые можно измерить наиболее точно), с учетом погрешностей, вносимых операциями расчета. Иллюстрация возможностей сформированного параметра для контроля температуры отпуска среднеуглеродистых легированных сталей.

На основании результатов работы [6] для использования в магнитном структурном анализе параметр M_r в знаменателе формулы (1) целесообразно заменить на параметр K_r . Получим следующий алгоритм для обработки результатов измерения:

$$H_k = H_c \frac{1-K_r}{K_r}. \quad (2)$$

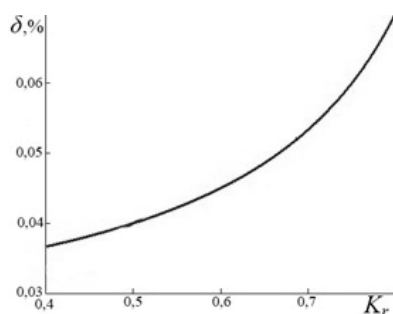


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности δ_{H_k} расчета параметра H_k от коэффициента $K_r = M_r/M_s$ в возможном для сталей диапазоне его изменения.

Расчет по (3) при $\delta_{H_c} = 2\%$, $\delta_{K_r} = 1\%$

Анализ погрешности δ_{H_k} измерения параметра H_k , вносимых математическими операциями его

расчета и погрешностями δ_{H_c} и δ_{K_r} измерения параметров H_c и K_r , проведенный по формулам работы [7], позволил получить:

$$\delta_{H_k} = \delta_{H_c} + \frac{1}{1-K_r} \delta_{K_r}. \quad (3)$$

Разработанная формула (2) позволяет с приемлемой погрешностью (рисунок 1) анализировать влияние технологических режимов получения материалов на их H_k . В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты расчета изменения H_k стали 40X от температуры T_t отпуска по результатам измерений в [8, табл. 26.2] ее H_c , M_r и M_s .

Результат показывает монотонность зависимости $H_k(T_t)$ во всем диапазоне изменения T_t в отличие от немонотонной зависимости от T_t других магнитных параметров [8]. Он является предпосылкой для разработки метода неразрушающего контроля твердости HRC стали 30 по результату определения H_k .

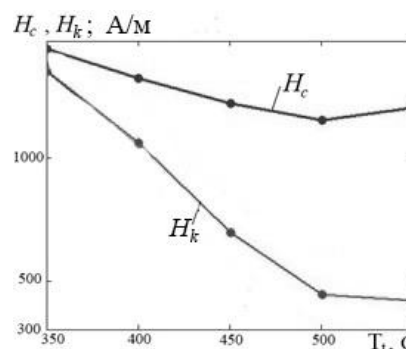


Рисунок 2 – Зависимость коэрцитивной силы H_c и алгоритма H_k стали 40X от температуры T_t отпуска. Расчет H_k по (2) по данным [8]

Полученные результаты позволяют при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из среднеуглеродистых сталей сосредоточить внимание на повышении точности измерения H_c и K_r материала изделий и отказаться от сложных и неточных измерений других магнитных параметров.

Литература

1. Поливанов, К. М. Ферромагнетики. Основы теории практического применения / К. М. Поливанов. – М.–Л.: ГЭИ, 1957. – 256 с.
2. Сандомирский, С. Г. Научные принципы определения внутреннего коэффициента размагничивания сталей по параметрам их предельных петель магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Актуальные

вопросы машиноведения: сб. науч. тр. – 2024. – Вып. 13. – С. 293–296.

3. Сандомирский, С. Г. Связь внутреннего коэффициента размагничивания ферромагнитного материала с параметрами предельной петли магнитного гистерезиса: применение в магнитной структурографии / С. Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2025. – Т. 74, № 1. – С. 104–112.

4. Способ определения внутреннего коэффициента размагничивания ферромагнитного материала: пат. 24437 Респ. Беларусь, МПК G01R 33/12 / С. Г. Сандомирский; заявл. 24.07.2023; опубл. 01.11.2024 // Афишны бюлетэнь. – 2024. – № 6.

5. Магнитные измерения / Е. Т. Чернышев [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 248 с.

6. Сандомирский, С. Г. Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 2023. – № 8. – С. 62–64.

7. Мастяева, И. Н. Численные методы: учеб. пособие / И. Н. Мастяева, О. Н. Семенихина. – М.: Московский международный институт эконометрии, информатики, финансов и права, 2004. – 103 с.

8. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.

УДК 681

ИНТЕГРАЦИЯ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Селятыцкий А. А., Гомма М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные вызовы и перспективы интеграции информационных технологий в процессы обеспечения единства измерений. Особое внимание уделяется применению интернета вещей (IoT), больших данных, искусственного интеллекта (ИИ) и блокчейна для создания эффективной, прозрачной и автоматизированной системы метрологической прослеживаемости.

Ключевые слова: метрологическая прослеживаемость, интернета вещей, искусственный интеллект, блокчейн, информационный портал.

INTEGRATION OF IT-TECHNOLOGY RELIGIONS IN THE PROCESS OF ENSURING METROLOGICAL TRACEABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS

Seliatytski A. A., Homma M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This article examines the current challenges and prospects of integrating information technology into the processes of ensuring the uniformity of measurements. Special attention is paid to the use of the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence (AI) and blockchain to create an efficient, transparent and automated metrological traceability system.

Keywords: metrological traceability, internet of things, artificial intelligence, blockchain, information portal.

Адрес для переписки: Селятыцкий А. А., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь e-mail: sefthu.by@gmail.com

В современном мире ИТ-технологии стали неотъемлемой составляющей всех отраслей производства и услуг. Особую значимость приобретает интернет вещей (IoT), который представляет собой сеть взаимосвязанных физических устройств, оснащенных датчиками и программным обеспечением. С бурным развитием технологии IoT количество измерительных сенсоров исчисляется уже миллиардами.

Эти устройства способны считывать, генерировать и передавать колоссальные массивы больших данных (Big Data), которые используются для оптимизации производства, прогнозирования нагрузок, удаленного мониторинга и оказания интеллектуальных услуг. Однако, несмотря на огромный потенциал, доверие к этим данным остается на критически низком уровне. Основная из причин – это техническая и экономическая невозможность обеспечения метрологической прослеживаемости для каждого отдельного сенсора в общей системе.

Эффективным решением этой проблемы является разработка и внедрение специализированных

программных протоколов и цифровых платформ, позволяющих автоматизировать процессы поверки, калибровки и установления прослеживаемости.

В Республике Беларусь, как и во многих других странах, проводится единая государственная политика, направленная на обеспечение единства измерений, в частности, на поддержание метрологической прослеживаемости средств измерений (СИ). Это требование распространяется на все СИ, используемые в промышленности, здравоохранении, торговле, энергетике, и других сферах, влияющих на качество жизни и безопасность граждан.

Традиционно метрологическая прослеживаемость представляет собой иерархическую цепочку передачи размеров единиц величин – от международных и национальных эталонов к рабочим средствам измерений через поверку и калибровку.

На законодательном уровне любое СИ, используемое в регулируемой сфере, подлежит процедуре утверждения типа и обязательной периодической поверке. По результатам поверки выдается бумажный сертификат, в котором указывается срок следующей поверки. Такой подход

сопряжен с рядом трудностей: риск потери или повреждения документа, сложность быстрого доступа к данным, высокие административные и ресурсные затраты на учет и хранение.

Применение в этом процессе цифровых сертификатов и электронных паспортов средств измерений кардинально повышает удобство хранения информации, исключает ее утерю и вносит значительный вклад в снижение бумажной нагрузки и экономии ресурсов.

Кроме этого, создание и развитие искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения открывает революционные возможности для метрологии. Эти технологии станут неоценимыми помощниками в следующих аспектах:

1. Расчет неопределенности измерений.

Для каждого СИ необходимо корректно присвоить значение неопределенности. Искусственный интеллект, анализируя большие массивы исторических данных о поведении аналогичных приборов в различных условиях, может значительно повысить точность и скорость этих расчетов. Дополнительной возможностью станет использование машинного обучения для расчета неопределенностей и разработки новых методик по их нахождению.

2. Прогнозная аналитика и оптимизация межповерочных интервалов (МПИ).

Вместо использования статичных, зачастую консервативных МПИ, системы на основе ИИ могут динамически рассчитывать оптимальный интервал поверки для каждого конкретного прибора. Анализируя данные о его дрейфе, интенсивности использования и условиях эксплуатации, ИИ сможет предсказать, когда точность прибора выйдет за допустимые пределы, что повысит надежность и снизит затраты.

3. Анализ больших данных.

ИИ позволяет начать эффективную работу с огромными объемами информации, связанными с СИ (данные поверок, калибровок, эксплуатации), выявляя скрытые закономерности и аномалии.

Каждое средство измерения содержит огромный объем данных: информация о типе, изготовителе, датах поверок, результатах калибровок, показателях точности (погрешности, неопределенности), историях эксплуатации и ремонта. Задача хранения этой информации и обеспечения круглосуточного, надежного и безопасного доступа к ней является критически важной. Ее эффективно решают современные облачные платформы и базы данных.

Имеющийся в Республике Беларусь государственный информационный ресурс, в сфере обеспечения единства измерений имеет огромное значение и может послужить прочной основой для создания комплексного метрологического информационного портала.

Метрологический информационный портал может включать:

1. Единый электронный реестр СИ, хранящий полную историю жизни каждого прибора.

2. Цифровые сертификаты о поверке и утверждении типа СИ, имеющие юридическую значимость благодаря электронной подписи.

3. Личные кабинеты для владельцев СИ, поверителей и органов госнадзора.

4. Специальные инструменты для формирования отчетности.

Для обеспечения максимальной доверия и защищенности данных критически важной государственной значимости (например, эталонные значения, результаты поверки эталонов, аккредитации лабораторий) идеально подходит технология блокчейн (blockchain).

Блокчейн обеспечивает неизменяемость данных. Любая запись о поверке, внесенная в распределенный реестр, не может быть задним числом изменена или удалена, что гарантирует высочайший уровень доверия и защиту от фальсификаций. Все участники системы (надзорные органы, владельцы приборов) могут проверять подлинность данных, не имея возможности их изменить.

Дополнительную информацию о приборе (например, руководство по эксплуатации, последние показания) можно сделать доступными для быстрого просмотра с любого мобильного устройства с помощью QR-кода, нанесенного на корпус СИ. Это удобно для оперативного контроля и идентификации в полевых условиях.

Переход от бумажных носителей к цифровым платформам, использующим искусственный интеллект, большие данные и блокчейн позволит повысить доверие к данным от IoT, обеспечить прозрачность и неизменность данных, а также снизит затраты.

Литература

1. Об обеспечении единства измерений: Закон Респ. Беларусь от 05.09.1995 № 3848-XII. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Z9503848> (дата обращения: 20.06.2025).

2. Ершов, И. А. Технология блокчейн в обеспечении метрологической прослеживаемости / И. А. Ершов, Р. Ж. Аймагамбетова, О. В. Стукач // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – С. 57–61.

УДК 535.6

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Селятыцкий А. А., Серенков П. С., Романчак В. М.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрен возможный способ определения межповерочных интервалов средств измерений - по альтернативному признаку. Предоставлена модель экстраполяции дрейфа метрологических характеристик подконтрольной выборки средств измерений. Предложенный подход обеспечивает достаточную достоверность прогноза межповерочного интервала средств измерений на основе минимум двух проверок подконтрольной партии средств измерений (первичной и первой периодической).

Ключевые слова: межповерочный интервал, альтернативный признак, дрейф, среднее квадратическое отклонение, математическое ожидание.

AN ALTERNATIVE METHOD FOR DETERMINING THE VERIFICATION INTERVAL MEASURING INSTRUMENTS

Seliatytski A. A., Serenkov P. S., Romanchak V. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article considers a possible way to determine the verification intervals of measuring instruments based on an alternative criterion. A model for extrapolating the drift of the metrological characteristics of a controlled sample of measuring instruments is provided. The proposed approach ensures sufficient reliability of the forecast of the inter-verification interval of measuring instruments based on at least two checks of the controlled batch of measuring instruments (primary and first periodic).

Keywords: verification interval, alternative feature, drift, standard deviation, mathematical expectation.

Адрес для переписки: Селятыцкий А. А., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь e-mail: sefthu.by@gmail.com

В сфере законодательной метрологии межповерочный интервал средств измерений (МПИ СИ) контролирует Госстандарт Республики Беларусь в соответствии с РМГ 74-2004 [1], в основе которого лежит теория метрологической надежности А. Э. Фридмана [2].

В докладе приведен анализ и недостатки существующей методики пересмотра МПИ СИ в процессе эксплуатации и предложен альтернативный метод, в основе которого положены методы статистического анализа. Альтернативный метод предполагает, что показатели метрологической надежности и оценки МПИ производятся на основании статистических данных о количестве СИ конкретного типа, прошедших и не прошедших плановую проверку.

Способ определения показателей метрологической надежности СИ и прогнозирования МПИ по альтернативному признаку очевидно менее информативный, но достаточно экономичный, так как не требует дополнительных расходов на испытания подконтрольной партии или сбор, предварительную обработку и обобщение количественной информации о действительных погрешностях СИ партии. Именно экономичность делает способ по альтернативному признаку достаточно привлекательным для мониторинга и прогнозирования значений МПИ СИ конкретного типа для целей совершенствования конструкции и (или) технологии изготовления СИ.

Для повышения доверия к способу определения показателей метрологической надежности СИ по альтернативному признаку нами на основе рекомендаций РМГ 74-2004 разработан метод

и алгоритм его реализации, обеспечивающие приемлемую достоверность результатов.

Для решения задачи о аппроксимации изменения математического ожидания и СКО погрешности СИ по статистическим данным результатов двух проверок (начальной и через промежуток времени T лет) используются по аналогии с [2] одновременно 2 модели:

1. Модель «всерного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием $m(t)$ и линейно растущим средним квадратическим отклонением $\sigma(t)$ (СКО), т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только разброс погрешности СИ в партии (рисунок 1):

$$m(t) = 0, \sigma(t) = \sigma(0) + bt, \quad (1)$$

где σ_0 – начальное СКО (на момент первичной проверки), b – коэффициент дрейфа СКО.

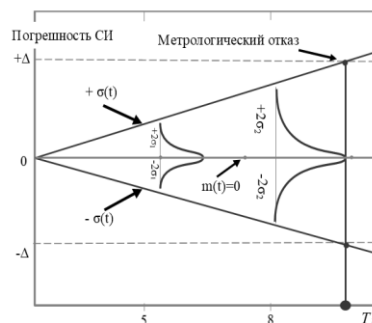


Рисунок 1 – Модель «всерного» случайного процесса

Для решения задачи о аппроксимации СКО погрешности СИ в партии по результатам двух проверок (начальной и через промежуток времени T лет) предложен алгоритм, состоящий из 5 шагов и представленный в докладе.

2. Модель «линейного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с постоянным СКО $\sigma(t)$ и линейно растущим математическим ожиданием $m(t)$, т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только систематическая составляющая погрешности СИ в партии (дрейф среднего значения) (рисунок 2):

$$\sigma(t) = \sigma(0), \quad m(t) = m(0) + k \frac{t}{T}, \quad (2)$$

где m_0 – начальное математическое ожидание погрешности СИ в партии (на момент первичной проверки), k – коэффициент дрейфа математического ожидания.

Для решения задачи о аппроксимации математического ожидания погрешности СИ по результатам двух проверок (начальной и через промежуток времени T лет) предложен аналогичный алгоритм, состоящий из 5 шагов, представленный в докладе.

По результатам двух расчетов принимаем решение:

$$T = \min(T_1, T_2). \quad (3)$$

Результаты прогноза МПИ альтернативным методом показывают существенное различие

оценок T_1 модели «всерного» случайного процесса и T_2 модели «линейного» случайного процесса. В зависимости от продукций и влияющих факторов, модель случайного процесса изменяется. За окончательный результат принимается наименьший интервал времени из двух моделей. Что в свою очередь существенно снижает риск потребителя.

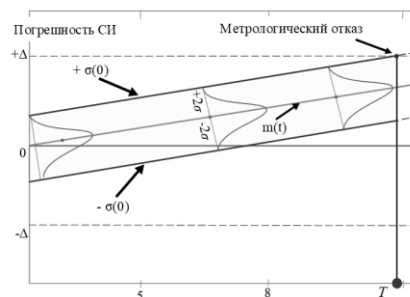


Рисунок 2 – Модель «линейного» случайного процесса

Литература

1. РМГ 74-2004. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – Введ. 01.07.2005. – М.: Стандартинформ, 2005. – 32 с.
2. Фридман, А. Э. Основы метрологии: современный курс / А. Э. Фридман. – СПб.: Проффессионал, 2008. – 279 с.

УДК 535.6

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Селятыцкий А. А., Серенков П. С., Романчак В. М.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены возможные способы определения межповерочных интервалов средств измерений – по количественному признаку. Предоставлены две модели концепции комбинированных методов. Обоснована комбинированная модель дрейфа, в которой дрейф математического ожидания погрешностей приборов учета в выборке описывается линейной моделью, а дрейф среднего квадратического отклонения погрешностей – экспоненциальной моделью.

Ключевые слова: межповерочный интервал, комбинированная модель, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение.

A COMBINED METHOD FOR DETERMINING THE VERIFICATION INTERVAL MEASURING INSTRUMENTS

Seliatytski A. A., Serenkov P. S., Romanchak V. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article discusses possible ways to determine the verification intervals of measuring instruments based on quantitative criteria. Two models of the combined method concept are provided. A combined drift model is substantiated, in which the drift of the mathematical expectation of the measurement errors in the sample is described by a linear model, and the drift of the average square deviation of the errors is described by an exponential model.

Keywords: verification interval, complex method, combined model, mathematical expectation, standard deviation.

Адрес для переписки: Селятыцкий А. А., пр. Независимости, 168/3, г. Минск 220141, Республика Беларусь e-mail: sefithu.bu@gmail.com

Межповерочный интервал средств измерений (МПИ СИ) является одной из составляющих необходимых для обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений. В сфере законодательной метрологии МПИ СИ контролирует Госстандарт Республики Беларусь в соответствии с законом об обеспечении единства измерений [1]. Расчет МПИ СИ регламентирован и базируется на теории метрологической надежности СИ Фридмана [2].

Недостатки подхода, изложенного в [2] вытекают из специфической сложной процедуры:

- формирования модели аппроксимации дрейфа метрологической характеристики (МХ) СИ в партии как регрессионной модели от времени эксплуатации;

- итерационного решения регрессионной модели СИ в партии.

Главный недостаток подхода заключается в том, что предложенная в [2] модель дрейфа МХ СИ как модель регрессии является интерполяционной, т.е. определяет МПИ, который распространяется на период между начальной и текущей поверками. Т.е. по факту модель дрейфа не является прогнозной [2].

В докладе приведен анализ недостатков существующей методики пересмотра МПИ и предложен комбинированный метод, в основе которого положен количественный признак. Особенностью использования комбинированного метода является синергетический эффект совместного проявления математического ожидания $m(t)$ и дрейфа СКО погрешностей измерений $v(t)$. Задача прогнозирования МПИ сводится к выбору типа и определению функций дрейфов $m(t)$ и $v(t)$. В результате анализа предложены две модели концепции комбинированного метода:

1. Комбинированная модель линейного типа.

Простейшей, часто используемой моделью изменения метрологической характеристики СИ $\delta(t)$ является линейная модель типа:

$$\delta(t) = x_0 + t \Delta x, \quad (1)$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени (рисунок 1).

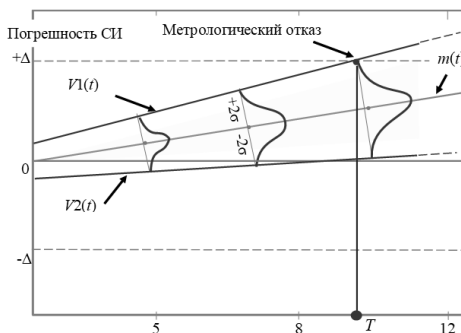


Рисунок 1 – Комбинированная модель линейного типа в соответствии с РМГ 74-2004

В результате линейная модель удовлетворительно описывает деградацию точностных характеристик СИ в период эксплуатации от одного до пяти лет.

2. Комбинированная модель комбинированного типа (рисунок 2):

дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке – линейная модель типа:

$$m(t) = x_0 + \Delta x t, \quad (2)$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени;

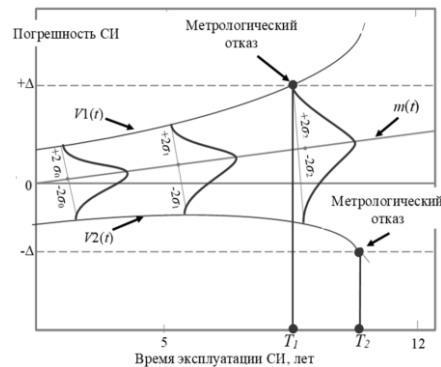


Рисунок 2 – Комбинированная модель комбинированного типа (дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке – линейная модель, дрейф СКО погрешностей измерений x_i СИ в выборке – экспоненциальная модель)

– дрейф СКО погрешностей измерений x_i СИ в выборке – экспоненциальная модель типа:

$$v(t) = k \sigma_0 \exp(t \lambda), \quad (3)$$

где $\lambda = \ln(\Delta \sigma / \sigma_0 + 1)$, k – коэффициент расширения, зависящий от уровня доверия p ; σ_0 – СКО в начальной точке (по результатам первичной поверки); $\Delta \sigma$ – скорость изменения

Для определения значения МПИ как времени эксплуатации до выхода интервала погрешности измерений за границы поля допуска $\pm \Delta$ с вероятностью $p = 0,95$, необходимо решить систему уравнений:

$$+\Delta = V_1(t) = (x_0 + \Delta x t) + k \sigma_0 \exp(t \lambda), \quad (4)$$

$$-\Delta = V_2(t) = (x_0 + \Delta x t) - k \sigma_0 \exp(t \lambda). \quad (5)$$

Соответственно решениями обоих уравнений являются расчетные значения времени эксплуатации СИ T_1 и T_2 (рисунок 2). Искомым значением МПИ является $T = \min(T_1, T_2)$.

К преимуществам обоснованной предлагаемой методики можно отнести следующее:

1. Методика использует корректную, понятную математическую экстраполяционную модель временного ряда, позволяющую в явном виде прогнозировать МПИ T .

2. Методика обеспечивает высокую оперативность получения информации для прогнозного расчета МПИ Т. Априорно выбранный характер типов моделей $m(t)$ и $v(t)$, формирующих комбинированные модели $V_1(t)$ и $V_2(t)$, основанный на анализе и обобщении существующей теории и практики деградации технических объектов во времени, обеспечивает достаточную достоверность прогноза поведения МХ СИ на основе минимум двух проверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической).

Литература

1. Об обеспечении единства измерений: Закон Респ. Беларусь от 05.09.1995 № 3848-ХП // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Z9503848> (дата обращения: 20.06.2025).
2. Фридман, А. Э. Основы метрологии: современный курс / А. Э. Фридман. – СПб.: Профессional, 2008. – 279 с.
3. Ефремов, Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: Алгоритмы и программы / Л. В. Ефремов. – СПб.: Нестор-История, 2011. – 200 с.

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ПРИБОРОВ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Сернов С. П.¹, Балохонов Д. В.¹, Колонтаева Т. В.¹,
Тадэуш Н. Н.¹, Федорцев Р. В.¹, Коничева Л. М.²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,

²ОАО «РУДЕНСК», Руденск, Беларусь

Аннотация. Для обеспечения безопасности дорожного движения в темное время суток и в условиях плохой видимости актуальной задачей является разработка автоматических систем очистки фар, исключая ослепление встречных водителей и сохранения эффективности головного освещения. Использование адаптивных систем освещения с несколькими лучами ближнего и дальнего света, разнообразных систем подсветки поворота современных механических транспортных средств требует пересмотра требований к проведению фотометрических испытаний при оценке качества очистки систем освещения дороги особенно сертификации которых описаны в данной работе.

Ключевые слова: устройства и системы освещения дороги, системы очистки, сертификация.

MECHANICAL VEHICLES ROAD ILLUMINATION DEVICES CLEANING SYSTEM CERTIFICATION TESTS

Sernov S. P.¹, Balokhonov D. V.¹, Kolontaeva T. V.¹,
Tadeush N.N.¹, Fiodartsau R. V.¹, Konicheva L. M.²

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²JSC Rudensk, Rudensk, Belarus

Abstract. To ensure road safety during the nighttime and in bad road conditions mechanical vehicles road lighting device cleaning system development becomes a necessity because said lighting devices have to be free of glaring and other harmful effects. The usage of adaptive lighting systems having several rays of upper and lower headlights and many other systems like projection systems calls for the revision of the requirements for photometric tests during the certification of said road illumination device cleaning systems. This question is the topic of this work.

Keywords: road illumination devices, clearing systems, certification.

Адрес для переписки: Д. В. Балохонов, пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by

Развитие техники в области механических транспортных средств сопровождалось постоянным ростом скорости транспортных средств, что увеличивает тормозной путь и делает необходимым качественное освещение дороги при движении. Кроме этого, на дорогах присутствуют различные виды загрязнений, снижающих силу света сигнальных огней и головного освещения за счет блокировки прохождения света. При этом рассеиватели устройств освещения дороги могут быть изготовлены как из стекла, которое сравнительно хорошо противостоит химическому воздействию за счет своей инертности и механическому воздействию за счет своей твердости, так и из пластиков, которые имеют худшую устойчивость к указанным воздействиям.

Загрязнения рассеивателей устройств освещения дороги можно разделить на следующие виды.

Пыль – минеральные и органические твердые частицы, которые накапливаются на внешней поверхности рассеивателя устройства освещения дороги и блокируют прохождение света. При отсутствии остальных видов загрязнений и осадков пыль легко удаляется набегающим потоком воздуха, однако при малой влажности воздуха (за счет статического электричества), при наличии жидкости на поверхности рассеивателя или при высокой шероховатости этой поверхности пыль закрепляется на ней и представляет серьезную проблему.

Жидкости сравнительно безопасны, так как стекают с поверхности рассеивателя, но в присутствии пыли они меняют вязкость и прочно закрепляются на поверхности рассеивателя, причем частицы пыли, неизбежно попадающие в жидкость, за счет эффекта Ребиндера могут приводить к царапинам на рассеивателе. Жидкости могут быть различными:

это могут быть как вода, так и растворы неорганических солей (реагенты для удаления снега и наледи зимой) или органические жидкости, например, остатки масел и топлива. Так как жидкости обладают прозрачностью и имеют цвет, они могут изменить цвет излучения устройств освещения дороги. Жидкие загрязнители могут приводить к химической эрозии и помутнению рассеивателя.

Чтобы удалить эти загрязнения, используются системы очистки устройств освещения дороги. Ранее в качестве этих систем применялись щетки или дворники, которые механически удаляли загрязнения. Их основным недостатком являлась малая надежность из-за наличия подвижных частей. Из-за механического воздействия дворников или щеток на рассеиватель в условиях наличия жидких загрязнений и пыли царапины на пластиковых рассеивателях возникали быстрее. Современные системы очистки устройств освещения дороги исключают применение механических устройств, заменяя их системами форсунок и разбрызгивателей. Их надежность выше, однако остается шанс, что загрязнения не будут удалены с рассеивателя полностью. Эту проблему решают, применяя специализированные жидкости для очистки и используя сопла для формирования струи жидкости с достаточно высокой для очистки скоростью. Требования к системам очистки устройств освещения дороги строгие и приводятся в Правилах ООН № 45 [1]: система очистки за один цикл (не более 10 секунд) должна удалить с поверхности рассеивателя загрязнения так, чтобы сила света в контрольных точках распределения силы света составила бы не менее 70 % от силы света устройства освещения дороги с незагрязненным рассеивателем.

Процедура испытания систем очистки устройств освещения дороги начинается с прогрева устройства освещения дороги и измерения его силы света в контрольных точках при чистом рассеивателе. Далее на его внешний рассеиватель пульверизатором наносится тестовая смесь, в состав которой входят минеральная пыль с заданным дисперсным составом, вода, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы и угольная пыль органического происхождения (для стеклянных рассеивателей). В случае пластиковых рассеивателей в смесь добавляется раствор поваренной соли для имитации химической эрозии. Смесь наносят равномерно, пока сила света устройства освещения дороги в контрольных точках не станет меньше 20 % своей величины при чистом рассеивателе. После высыхания смеси устройство освещения выключают и дают ему остыть. Не позднее чем через 2 часа устройство освещения дороги вновь включают, и приводят в действие его систему очистки на время не более 10 секунд. Далее

устройству освещения дороги вновь дают высохнуть и измеряют силу света в контрольных точках. Если измеренные значения составили не менее 70 % силы света устройства освещения дороги при чистом рассеивателе, система очистки соответствует требованиям Правила ООН № 45.

Следует отметить, что процедура испытаний систем очистки устройств освещения дороги, приведенная в Правилах ООН № 45 [1], достаточно хорошо имитирует условия работы для всех устройств освещения дороги, однако процедура измерения силы света в контрольных точках (и расположение самих контрольных точек) оптимизирована для устройств головного освещения (фар), с функциями ближнего и дальнего света, но не позволяет оценивать изменение качества более сложных адаптивных систем переднего освещения (АСПО) транспортных средств категорий М и N, отличающихся расширенным функционалом и многообразием используемых конструкторских решений.

Появление новой номенклатуры огней в соответствии с Правилами ООН №149 [2], включающих адаптивные системы переднего освещения ближнего и дальнего света, отличающихся функциональным назначением (для движения в черте города, по автомагистрали, в неблагоприятных дорожных дорожных условиях), световым распределением ближнего света (симметричные и асимметричные), наличием или отсутствием поворотного освещения.

В свою очередь это обуславливает необходимость уточнения фотометрических характеристик, учитывающих спецификации АСПО.

Отдельным вопросом остается контроль датчиков АСПО, отвечающих за быстроедействие систем освещения и их очистки.

Литература

1. Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions. Add. 44: Reg. No. 45. Uniform provisions concerning the approval of headlamp cleaners and of power-driven vehicles with regard to headlamp cleaners // UNECE. – 2019. – URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R045rev2_e.pdf (date of access: 24.09.2025)
2. Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions. Add. 148 Reg. No. 149. Uniform provisions concerning the approval of road illumination devices (lamps) and systems for power-driven vehicles // UNECE. – 2019. – URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf> (date of access: 24.09.2025)

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

**ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ
ДОРОГИ СОВРЕМЕННЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ
МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Сернов С. П.¹, Балохонов Д. В.¹, Колонтаева Т. В.¹,
Тадэуш Н. Н.¹, Федорцев Р. В.¹, Коничева Л. М.²**

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

²ОАО «РУДЕНСК», Руденск, Беларусь

Аннотация. Появившиеся недавно современные механические транспортные средства (включая электро-мобили, беспилотные автомобили, средства персональной мобильности и др.) используют устройства освещения дороги нетрадиционным и нерегламентированным образом. Поэтому при сертификации устройств и систем освещения дороги для них имеются определенные особенности, которые описаны в данной работе.

Ключевые слова: устройства и системы освещения дороги, сертификация, испытания на износ.

**MODERN MANNED AND UNMANNED MECHANICAL VEHICLES ROAD
ILLUMINATION DEVICES AND SYSTEMS CERTIFICATION PECULIARITIES**

**Sernov S. P.¹, Balokhonov D.V.¹, Kolontaeva T.V.¹,
Tadeush N.N.¹, Fiodartsau R.V.¹, Konicheva L.M.²**

¹Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

²JSC Rudensk. Rudensk, Belrus

Abstract. There appeared a lot of new types of mechanical vehicles (electromobiles, unmanned vehicles, means of personal mobility etc.) that use road lighting devices and systems in unconventional ways. This is the reason these devices have certification peculiarities that are discussed in the work

Keywords: road illumination devices, certification, wear tests.

*Адрес для переписки: Д. В. Балохонов, пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by*

С развитием систем искусственного интеллекта и изменением общественных привычек людей изменяются и устройства освещения дороги механических транспортных средств.

В настоящее время наблюдаются следующие основные мировые тенденции в применении устройств освещения дороги механических транспортных средств.

Увеличение доли беспилотных механических транспортных средств на дорогах общего пользования. Особенно это характерно для развитых стран. Ранее беспилотные транспортные средства (беспилотные грузовики) применялись в основном на высокоскоростных трассах, имеющих простую форму и минимальное число поворотов и съездов. В таких условиях взаимодействие с пешеходами не было необходимо, а алгоритм поведения водителей-людей на этих трассах незначительно отличался от программ беспилотных грузовиков.

В настоящее время беспилотные транспортные средства передвигаются в том числе в условиях городского движения, которое имеет значительно большую неопределенность за счет наличия множества транспортных средств, управляемых людьми, и большого числа пешеходов.

В таких условиях роль устройств освещения дороги для беспилотных транспортных средств состоит не в обеспечении видимости для водителя (его заменяет система управления, которая полагается в том числе на радарные или лидарные

комплексы, а не на видимый свет), а в обеспечении заметности беспилотного транспортного средства для остальных людей-участников движения. Из-за этого, в частности, появился новый класс устройств освещения дороги – проекторы (например, проекторы указателя поворота и проекторы заднего хода).

Нельзя сказать, что проекционная технология является только что созданной, так как уже несколько лет назад появились проекционные адаптивные системы головного освещения. Кроме создания удовлетворяющего Правилам ООН распределения силы света, они способны проецировать на дорожное покрытие произвольные изображения, так как они используют в качестве источника света мощную пиксельную матрицу или мощные светодиоды совместно с цифровыми микрозеркальными устройствами. Например, такое головное освещение способно спроецировать на дорогу перед остановившимся транспортным средством изображение пешеходной «зебры», которое укажет пешеходу возможность и направление для перехода.

Однако характеристики проекторов пока что не регламентированы и находятся в процессе согласования, причем обсуждение характеристик проекторов указателей поворота для внесения в Правила ООН № 148 началось в октябре–ноябре 2024 г. (инициатор: WP.29-GRE Европейской экономической комиссии) Эти устройства проецируют сигналы соответствующего цвета и формы на дорожное покрытие рядом с транспортным средством.

Хотя характеристики проекторов пока находятся в стадии обсуждения, уже ясно, что основными проблемами при их применении будет ослепление (в случае высоких грузовых транспортных средств), цветопередача (человеческое зрение компенсирует цвета при цветном освещении, так что вскоре после включения цветная проекция указателя поворота перестает восприниматься цветной в темное время суток и при наличии окрашенного уличного освещения) и форма проекции, которая должна быть отлично различимой на любом дорожном покрытии как с близкого, так и с дальнего (более десяти метров) расстояния. Метрологическое обеспечение для сертификации таких устройств освещения дороги должно, по аналогии с системами головного освещения, включать в себя как методы измерения освещенности и распределения освещенности, так и методы контроля формы проекции, например, как это осуществляется для контроля светотеневой границы при сертификации систем головного освещения.

Взрывообразное развитие средств персональной мобильности. Эта тенденция очень характерна для больших городов. Характеристики устройств освещения дороги для средств персональной мобильности практически не регламентированы, что приводит к повышенному количеству столкновений между ними и с пешеходами, особенно в темное время. В отдельных странах эту проблему решают комплексно, например, в Республике Беларусь мощные и скоростные (максимальная скорость сверх 35 км/ч) средства персональной мобильности приравняются к мопедам, и их будет необходимо оснащать соответствующими по классу устройствами освещения дороги. В остальных странах пока не предложено никаких решений в этой области.

Широкое применение электромобилей. Электромобили в силу принципов работы и конструкции являются более экономичными и энергоэффективными транспортными средствами, что делает их удобными для городских улиц. Электромобили имеют более широкие возможности для использования светодиодных устройств освещения дороги, что выражается в появлении комбинированных передних и задних огней, буквально оконтуривающих транспортное средство при работе. В соответствии с Правилами ООН, такие огни рассматриваются как комбинация основных (размещенных в углах корпуса в регламентированных Правилами местах) и зависимых

(размещенных практически в произвольных местах на корпусе) огней. При этом остро встает вопрос о максимальной силе света и распределении силы света таких комбинированных огней при сертификации: основной огонь, который обязан работать в любом случае, может дополняться или не дополняться зависимым огнем. Например, если рассмотреть комбинацию заднего габаритного огня (основного) с габаритным огнем, расположенным в заднем спойлере или на крышке багажника электромобиля (зависимым), то при открытой крышке багажника зависимый огонь не будет добавлять свою силу света к основному (например, на стоянке), а в движении при закрытом багажнике сила света комбинации может превысить безопасный с точки зрения ослепления максимум. Правила ООН № 148, регламентирующие эти огни, не содержат указаний на значения максимальной силы света условий ее измерения в случае комбинированных огней. Если пользоваться правилом «что не запрещено – разрешено», то вполне возможно ослепление водителей транспортных средств двойной максимальной силой света даже от габаритных огней.

Также при сертификации таких комбинаций возникает вопрос об оптическом центре: разнесенные огни комбинации нельзя считать точечным источником света ни на каком расстоянии, и поэтому непонятно, в каком направлении должен наблюдаться главный максимум распределения силы света комбинации. В настоящее время этот вопрос пытаются решить, запрашивая производителя комбинации о местонахождении оптического центра.

Таким образом, при сертификации современных устройств и систем освещения дороги механических транспортных средств имеются следующие особенности:

Появление новых типов устройств освещения дороги требует немедленной разработки для них регламентирующих стандартов.

Метрологическое обеспечение для сертификации устройств и систем освещения дороги должно включать как методы и методики измерения распределения силы света, освещенности и координат цветности, так и методы для измерения качества светотеневой границы, что делает процедуру сертификации сложнее.

Процедуры сертификации должны обеспечить надежную сертификацию комбинированных огней из-за их протяженности и высокой суммарной силы света.

УДК 006.027

РАЗРАБОТКА ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ НА ОСНОВЕ ДОКУМЕНТАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Серякова А. В., Токарь О. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Отражено создание базы терминов на основе документации предприятия в рамках информационно-поисковой системы «СТАНДАРТ».

Ключевые слова: термин, терминологическая база, определение термина, документация, стандартизация.

DEVELOPMENT OF A TERMINOLOGICAL BASE BASED ON THE ENTERPRISE DOCUMENTATION

Seryakova A. V., Tokar O. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The creation of a term base based on enterprise documentation within the framework of the "STANDARD" information retrieval system is reflected.

Keywords: term, terminology base, definition of term, documentation, standardization.

*Адрес для переписки: Токарь О. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tokar.o@bntu.by*

Целью работы являлась подготовка единой системы терминов для повышения точности и согласованности в документации и коммуникации ОАО «Минский тракторный завод».

Создание и использование терминологической базы является актуальным, поскольку оно способствует унификации терминологии и повышению точности коммуникации внутри предприятия и в отрасли в целом. Это позволяет снизить риск ошибок и недоразумений при разработке документации, а также ускоряет процессы обучения новых сотрудников.

Для создания терминологической базы использовалась полнотекстовая информационно-поисковая система для технического нормирования и стандартизации ИПС «СТАНДАРТ».

Терминологическая база в ИПС «СТАНДАРТ» представляет собой систематизированный набор определений и терминов, применяемых в области технического нормирования и стандартизации.

В базе представлена полная информация о технических нормативных правовых актах в сфере технического нормирования и стандартизации, а также о международных, региональных и национальных стандартах и регламентах.

Контекстный поиск ТНПА осуществляется в библиографической базе данных по обозначению, наименованию, аннотации, ключевым словам и терминам. Перед проведением поиска нужно выбрать вид баз данных, по которым необходимо выполнить поиск. Такой поиск удобен, когда нужно найти информацию, связанную с определенной ситуацией или темой.

Расширенный поиск ТНПА проводится в библиографической базе данных по любому сочетанию следующих полей: обозначение; база данных; наименование; состояние; ОГКС; срок действия; наименование организации-разработчика; дата введения или принятия.

Значения выводятся в виде иерархического дерева. Разделы, которые имеют вложенные подразделы помечены слева значком «+». Нажатие на этот значок позволяет развернуть древовидную структуру выбранного раздела.

Ключевые слова в списке представляют собой гиперссылки, выбирая которые можно получить в результате набор ТНПА, которые содержат выбранное ключевое слово.

ОАО «Минский тракторный завод» – один из крупнейших заводов в Беларуси, специализирующийся на производстве сельскохозяйственной и строительной техники. В структуре предприятия функционирует конструкторский технологический отдел стандартизации, чьими задачами являются:

- обеспечение подразделений актуализированными техническими нормативными правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации;
- обеспечение требованиям ТНПА конструкторской, технологической и другой документации, разрабатываемой структурными подразделениями и проходящей нормоконтроль;
- проведение работ по введению в действие и управлению стандартами организации и инструкциями системы менеджмента качества.

На предприятии насчитывается 3295 документа. Для создания терминологической базы было проанализировано 309 стандартов предприятия, 243 инструкции, 286 методики, 220 положений, 93 технических условий, 7 руководств по качеству, 390 технологических инструкций, 15 систем менеджмента безопасности труда.

При отборе терминов было решено руководствоваться несколькими критериями:

- термины должны быть актуальными для текущих процессов и задач организации;
- каждый термин должен иметь четкое и однозначное значение, чтобы избежать недопонимания среди сотрудников;

– термины должны быть применимы в различных контекстах внутри организации, т. е. они должны быть понятны не только узкому кругу специалистов, но и всем сотрудникам, участвующим в процессе.

При отборе терминов не учитывались те, которые имеют ссылки на внешние нормативные акты, такие как ГОСТы, постановления и другие официальные документы. Это связано с тем, что такие термины могут иметь свои определения и контексты применения, отличающиеся от установленных организацией.

Если в терминологической базе выявляются одинаковые термины и определения, необходимо определить основной документ, который будет служить источником для данного термина. Это позволит избежать путаницы и обеспечит единообразие в использовании терминологии на предприятии. Основным документом будет тщательно выбран на основе его актуальности и авторитетности в соответствующей области. При пересмотре документации, содержащей эти термины, важно указывать ссылку на основной документ, что обеспечит легкий доступ к проверенной информации. Такой подход способствует поддержанию актуальности и точности терминологической базы, а также облегчает работу сотрудников с документами.

Если в терминологической базе встречается термин с разными определениями, необходимо определить возможность их унификации. Важно рассмотреть контекст, в котором используется каждый из терминов, и выявить, есть ли возможность создать единое определение, которое будет охватывать все аспекты. Если унификация невозможна из-за различий в значении или применении, следует рассмотреть вариант изменения термина. Для этого можно добавить уточняющее слово или фразу, что позволит четко различать термины и их определения. Например, можно использовать прилагательные или другие модификаторы, чтобы обозначить специфику каждого термина. Такой подход не только улучшит понимание и использование терминологии, но и предотвратит путаницу.

Алфавитный указатель представляет собой набор гиперссылок. Выбирая любую из них, ниже откроется список терминов, которые начинаются именно на эту букву. Поиск информации можно выполнять как по термину, так и по источнику, откуда он был взят. Это позволяет находить нужные данные более быстро и точно.

Поиск также можно выполнять, вводя ключевое слово в строку определения термина. Это позволяет быстро найти нужный термин по его

описанию или характеристикам. Этот метод особенно полезен, когда пользователь не помнит название термина, но знает его описание.

Терминологическая база предназначена для сотрудников предприятия, специалистов по качеству, инженеров и руководителей.

Инженеры-конструкторы используют терминологическую базу для разработки новых моделей техники, чтобы избежать путаницы в обозначениях деталей и узлов. Например, при проектировании нового трактора важно использовать стандартизированные названия для всех компонентов, таких как «коробка передач», «двигатель», «шасси» и т.д.

Технологи применяют термины при разработке технологических процессов. Это обеспечивает согласованность между проектированием и производством. Например, при описании технологического процесса сварки важно использовать точные термины для обозначения методов, материалов, оборудования.

Специалисты по контролю качества используют терминологию для описания стандартов и требований к продукции. Это помогает в проведении проверок и сертификаций. Например, термин «допустимый уровень дефектов» позволяет четко определить критерии оценки качества.

Продавцы и маркетологи применяют общепринятые термины для точного описания характеристик продукции клиентам. Это способствует лучшему пониманию предложений. Например, использование термина «мощность двигателя» вместо неформальных выражений помогает избежать недоразумений с клиентами.

Специалисты по технической поддержке используют терминологическую базу для предоставления точной информации клиентам о продукции и ее эксплуатации. Например, при ответах на вопросы клиентов о ремонте или обслуживании техники важно использовать стандартизированные термины.

Благодаря этой базе пользователи смогут быстро находить точные определения терминов и избегать недоразумений при обмене информацией. Это повысит качество коммуникации внутри компании и обеспечит единое понимание технических и нормативных требований. Для предприятия использование терминологической базы поможет снизить ошибки, связанные с неправильным толкованием терминов, а также ускорит процессы обучения новых сотрудников.

В результате предприятие повысит свою эффективность, обеспечит соответствие стандартам и укрепит репутацию на рынке.

УДК 665.58

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ДЕКОРАТИВНОЙ КОСМЕТИКИ

Соломахо В. Л., Жук Т. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ нормативных документов, регламентирующих требования к качеству декоративной косметики в Республике Беларусь, на базе ООО «Люкс-Визаж». Рассмотрены стандарты СТБ 1672-2006, СТБ 1674-2006 и СТБ 1886-2008, определяющие показатели качества изделий на жировосковой основе, порошкообразных и компактных средств, а также лаков для ногтей. Охарактеризованы основные инструментальные и органолептические показатели, влияющие на качество продукции.

Ключевые слова: декоративная косметика, качество, показатели, стандарты СТБ, нормативные документы

CHARACTERISTICS OF QUALITY INDICATORS OF DECORATIVE COSMETICS

Solomakho V. L., Zhuk T. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. An analysis of regulatory documents governing the quality requirements for decorative cosmetics in the Republic of Belarus was conducted based on the example of Lux-Visage LLC. The standards STB 1672-2006, STB 1674-2006, and STB 1886-2008, which define the quality indicators for oil-based, powdered, and compact products, as well as nail polish, were considered. The main instrumental and organoleptic indicators affecting product quality are characterized.

Keywords: decorative cosmetics, quality, indicators, STB standards, regulatory documents.

*Адрес для переписки: Соломахо В. Л., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: solomaho@bntu.by*

В Республике Беларусь более 100 компаний занимаются производством парфюмерно-косметических товаров. Наиболее крупными и известными среди них являются ООО «Витекс», ООО «Белита», САОА «Парфюмерно-косметическая фабрика “Модум – наша косметика”», ООО «Люкс-Визаж», ООО «Белкосмекс» и другие.

В последние годы предприятия активно внедряют научно-исследовательские разработки, создают новые виды продукции и осваивают современные технологии. Улучшение художественного оформления, совершенствование упаковки и применение современных подходов к товарной информации способствовали росту спроса на белорусскую косметику как на внутреннем, так и на зарубежных рынках. Развитие ассортимента парфюмерно-косметических товаров осуществляется по нескольким направлениям: создание серий продукции, объединенных общим оформлением или сходным сырьевым составом; разработка принципиально новых изделий; повышение качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции [1].

Номенклатура показателей качества изделий декоративной косметики определяется как их назначением, так и составом. Так, требования к качеству губных помад, блеска, бальзамов для губ, теней для век, румян и карандашей на жировой основе регламентируются стандартом СТБ 1672–2006 «Изделия декоративной косметики на жировосковой основе. Общие технические условия». Важнейшими компонентами таких средств являются воск (пчелиный, карнаубский), придающий пластичность и стойкость, а также масла (касторовое, масло какао и др.), которые действуют как смягчающие вещества и растворители красителей. Дополнительно в состав

вводят витамины (Е, А), керамиды, растительные экстракты и солнцезащитные компоненты.

К основным физико-химическим показателям декоративных средств на жировой основе относятся температура каплепадения, а для губных помад также кислотное и карбонильное числа. Температура каплепадения должна быть оптимальной: при ее снижении косметика растекается, а при повышении – плохо наносится на кожу. Кислотное и карбонильное числа характеризуют качество жировых компонентов, определяя их свежесть и пригодность. Испорченные жиры придают изделию горьковатый вкус, неприятный запах и комковатую структуру.

Согласно стандарту, допускается наличие декоративных добавок (блестки, волокна и др.), а также незначительных разводов в изделиях с перламутровым блеском, не влияющих на общее качество. К практическим показателям качества относят стойкость к стиранию, красящую способность и удобство пользования [2].

Качество декоративных порошкообразных и компактных средств (пудры, теней, румян) определяется требованиями СТБ 1674-2006 «Изделия косметические порошкообразные и компактные. Общие технические условия». Основное требование к их качеству заключается в однородности состава и цвета при отсутствии посторонних включений, комков и запаха, не связанного с введенной парфюмерной композицией. Компактные изделия должны выдерживать испытания на прочность: при трехкратном падении с высоты 20 см на твердую поверхность они не должны растрескиваться. Практическими методами

оцениваются стойкость к стиранию, кроющая способность и удобство нанесения [3].

Требования к качеству лаков для ногтей регламентированы СТБ 1886-2008 «Изделия косметические для ухода за ногтями. Общие технические условия». Основные свойства лака определяются характеристиками его компонентов: нитроцеллюлоза и синтетические смолы обеспечивают образование прочной пленки и хорошую адгезию к ногтю; пластификаторы (например, касторовое масло) придают покрытию эластичность; пигменты и красители обеспечивают стойкость цвета. Перламутровый эффект достигается добавлением натурального или синтетического перламутра.

Физико-химическими показателями качества лаков являются вязкость, адгезия и время высыхания. Вязкость должна быть оптимальной, чтобы лак равномерно наносился и не стекал в ногтевое ложе. Адгезия определяет прочность маникюра и его устойчивость к воде и бытовой химии. Время высыхания должно обеспечивать равномерное распределение покрытия без полос и наплывов. Дополнительно при испытаниях оцениваются стойкость цвета, устойчивость к бытовым средствам, прочность пленки, изменение блеска и склонность к растрескиванию [4].

Выводы:

УДК 621.713

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Спесивцева Ю. Б., Кубрин Д. С., Лужинская А. И., Кисляков Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена методика оценки технологической себестоимости реализации параметров деталей контрольного приспособления для измерения полного радиального биения, влияющих на точность измерения. Методика основана на квалиметрическом методе попарного сопоставления и может быть применена для оптимизации допусков по стоимости, преобразуя качественные суждения о стоимости в количественный показатель.

Ключевые слова: контрольное приспособление, расчет на точность, технологическая себестоимость, метод попарного сопоставления.

TOLERANCE OPTIMIZATION BASED ON A QUALIMETRIC ASSESSMENT OF PART MANUFACTURING COSTS

Spesivtseva Y. B., Kybrin D. S., Luzhinskaya A. I., Kiselyakov N. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A method is presented for assessing the technological cost of implementing parameters of control fixture parts for measuring total radial runout, which affect measurement accuracy. The method is based on a qualimetric method of pairwise comparison and can be applied to optimize tolerances based on cost, converting qualitative judgments about cost into quantitative indicators.

Keywords: gauging fixture, accuracy analysis, manufacturing cost, method of paired comparisons.

*Адрес для переписки: Спесивцева Ю. Б., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Для обеспечения требуемого качества и взаимозаменяемости деталей на всех этапах производства необходим точный контроль их параметров. Цель исследования – разработать стратегию, позволяющую добиться удовлетворительной точности контроля при одновременной минимизации стоимости изготовления деталей контрольного приспособления.

В нашей стране разработана достаточно современная база документов по стандартизации, регламентирующих номенклатуру показателей и требования, определяющие качество декоративно косметической продукции.

Номенклатура показателей определяется видом продукции, ее составом, назначением и особенностями применения; при этом используются как инструментальные, так и органолептические методы контроля [5].

Литература

1. ТР ТС 009/2011. О безопасности парфюмерно-косметической продукции. – Введ. 01.07.2012. – [М.]: Евразийская экономическая комиссия, 2011. – 279 с.
2. СТБ 1672-2006. Изделия декоративной косметики на жировосковой основе. Общие технические усл. – Введ. 01.07.2007. – Мн.: БелГИСС, 2007. – 10 с.
3. СТБ 1674-2006. Изделия косметические порошкообразные и компактные. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2007. – Мн.: БелГИСС, 2006. – 12 с.
4. СТБ 1886-2008. Изделия косметические для ухода за ногтями. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2009. – Мн.: БелГИСС, 2008. – 14 с.
5. ГОСТ 29188.0-91. Изделия парфюмерно-косметические. Правила приемки, отбор проб, методы органолептических испытаний. – Введ. 01.01.1993. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 5 с.

Для решения задачи оптимизации допусков параметров деталей приспособления, влияющих на погрешность измерения, могут быть использованы два подхода. Первый предполагает детальный анализ влияющих параметров, расчет технологической себестоимости и последующее назначение допусков с использованием одной из математических моделей оптимизации [1]. Если

подробная информация о конструкции и технологическом процессе отсутствует, то для решения задачи назначения допусков наиболее оправдано применение упрощенного подхода с применением методов квалиметрии [2]. Это позволяет получить приблизительные, но достаточные для принятия обоснованных решений данные, не затрачивая ресурсы на детальные расчеты, которые все равно не будут точными из-за недостатка исходных данных.

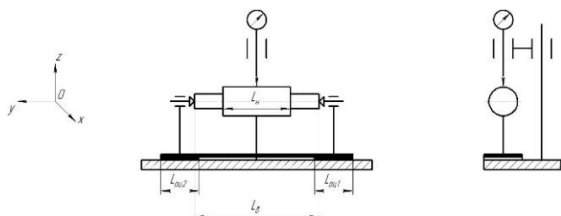


Рисунок 1 – Схема измерения полного радиального биения

Рассмотрим возможность оптимизации допусков с помощью методов квалиметрии, проиллюстрируя этот подход на примере контрольного приспособления для измерения полного радиального биения (рисунок 1). Центры передвигаются вместе с измеряемой деталью относительно неподвижной стойки с индикатором. Для уменьшения погрешности, связанной с отклонением от плоскостности установочных поверхностей стоек индикатора и центров сделана выборка поверхности, исключая выпуклость этих поверхностей.

Наиболее значимыми являются следующие источники инструментальной погрешности измерения:

- А) отклонение от плоскостности плиты;
- В) отклонение профилей продольных сечений отверстий стоек, предназначенных для установки центров;
- С) отклонение от соосности конической и цилиндрической поверхностей центра;
- Д) разнорысность центров.

Для оценки стоимости технологической реализации допусков может быть использован метод попарных сопоставлений, который используется в квалиметрии для систематизации субъективных экспертных оценок и преобразования качественных суждений в количественные показатели. Вместо оценки стоимости каждой операции, что часто является сложным на этапе проектирования изделия, метод предлагает простое сравнение: «что изготовить дороже?». Полученные индексы превалирования дают основу для рационального распределения допусков. На параметры с высоким индексом можно назначить более широкие допуски, чтобы снизить затраты, а на допуски с низким индексом – более жесткие, чтобы повысить точность при минимальных расходах. Заполнение таблицы проводится путем попарного сравнения параметров. В каждой ячейке ставится «1», если реализовать при изготовлении параметр в строке дороже чем параметр в столбце и «0»,

если наоборот. Если по мнению эксперта затраты одинаковы – «0,5» (таблица 1).

Таблица 1 – Оценочная матрица

	A	B	C	D	Сумма
A	—	1	1	1	3
B	0	—	0	1	1
C	0	1	—	1	2
D	0	0	0	—	0

При заполнении матрицы руководствовались следующими рассуждениями:

А и В. Устранение отклонения от плоскостности плиты (шлифование большой поверхности и контроль) обычно дороже, чем точная обработка отверстия.

А и С. Обеспечение соосности может быть сложным, но обработка большой плиты дороже.

А и D. Разнорысность центров можно исправить недорогой регулировкой.

В и С. Обработка одного отверстия и обработка соосных отверстий сопоставимы по сложности, но С – немного сложнее.

В и D. Регулировка разнорысности дешевле, чем точная обработка отверстия.

С и D. Обеспечение соосности отверстий требует сложной обработки, тогда как разнорысность можно компенсировать регулировкой.

Частота превалирования f по стоимости – это сумма всех оценок в строке для каждого параметра (насколько параметр оценен как более дорогой по сравнению с другими). В нашем случае параметр А – самый дорогой ($f(A) = 3$), D – самый дешевый ($f(B) = 0$).

Общее число возможных суждений – это количество всех сравнений параметров.

$$S = \frac{n(n-1)}{2},$$

где S – общее число возможных суждений или комбинаций; n – количество параметров.

В нашем случае $n = 4$, $S = 6$.

Индекс превалирования K показывает относительную значимость по стоимости каждого параметра. Сумма всех индексов должна быть равна 1.

$$K = \frac{f}{S},$$

где f – частота превалирования; S – общее число возможных суждений или комбинаций.

В нашем случае $K(A) = 0,5$; $K(B)=0,17$; $K(C)=0,33$; $K(D)=0$.

Результаты анализа показывают, какие параметры наиболее затратны для обеспечения точности. На параметры с высоким индексом превалирования (А, С) стоит назначать наиболее широкие допуски, насколько это позволяет допустимая погрешность измерения. На параметры с низким индексом (В, D) – более узкие допуски.

Для более сложного многокритериального анализа можно использовать метод анализа иерархий Саати, который используется для принятия решений, представляя сложную проблему иерархической структурой.

Для задачи оптимизации допусков приспособления на верхнем уровне будет цель – минимизация стоимости при обеспечении требуемой точности. На среднем – критерии оценки (вклад в погрешность измерения, технологическая себестоимость). На нижнем – альтернативы (источники инструментальной погрешности измерения).

Метод основан на попарном сравнении. Эксперты сравнивают каждую пару деталей по каждому критерию, используя интуитивно понятную шкалу. Вычисляются весовые коэффициенты, которые преобразуют качественные суждения в количественные данные. Метод позволяет также учесть важность самих критериев. Для каждого критерия создается отдельная матрица, где сравниваются параметры, на основе которых можно вычислить «глобальный» приоритет для каждой

детали – взвешенную сумму ее локальных приоритетов по каждому критерию, умноженную на веса самих критериев.

Таким образом, путем попарного сопоставления можно получить коэффициенты относительной себестоимости для параметров различных уровней точности (кавалитетов, степеней точности) в экономически обоснованных пределах изготовления.

Литература

1. Снижение стоимости изделия путем оптимизации конструкторских размерных цепей / Ю. Б. Спесивцева [и др.] // Наука и техника. – 2025. – Т. 24, № 3. – С. 217–224.
2. Методы менеджмента качества. Квалиметрия: учеб.-метод. пособие для вузов / С. С. Соколовский [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2009. – 165 с.

УДК 621.713

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ И ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Спесивцева Ю. Б., Кубрин Д. С., Лужинская А. И., Кисляков Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена методика анализа и расчета контрольного приспособления для измерения полного радиального бисения, представленного схемой. Выявлены источники погрешности измерения, определена суммарная погрешность. На отклонения геометрических параметров, влияющих на точность измерения, назначены допуски разных уровней точности, определена технологическая себестоимость их реализации.

Ключевые слова: контрольное приспособление, расчет на точность, технологическая себестоимость.

CALCULATING THE ACCURACY AND COST OF INSPECTION FIXTURES FOR AN OPTIMIZATION MODEL

Spesivtseva Y. B., Kybrin D. S., Luzhinskaya A. I., Kiselyakov N. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A method is presented for the analysis and calculation of a control fixture for measuring total radial runout, as shown in a diagram. Sources of measurement error are identified and the total error is determined. Tolerances of various precision levels are assigned to the deviations of geometric parameters that affect measurement accuracy, and the technological cost of their implementation is determined.

Keywords: inspection fixture, accuracy calculation, manufacturing cost.

*Адрес для переписки: Спесивцева Ю. Б., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Наряду с универсальными средствами измерений при контроле отклонений формы и взаимного расположения поверхностей деталей используются контрольные приспособления. Точность измерения, которую обеспечивают эти приспособления, напрямую зависит от точности изготовления их собственных деталей. Для повышения эффективности проектирования контрольных приспособлений необходимо иметь формализованную методику расчета на точность на основе их схематического представления. В основу такого расчета должна быть положена целевая установка обеспечения требуемой точности измерений при минимальных затратах. Решение оптимизационной задачи имеет четыре основных этапа:

1. Подготовка исходных данных, состоящая в определении допускаемой инструментальной погрешности измерения путем вычленения ее из

общей допускаемой погрешности измерения на основе оценки возможных методических, субъективных погрешностей измерений, а также погрешностей условий.

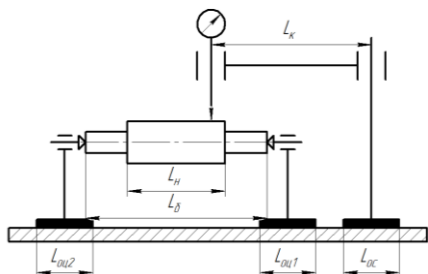
2. Выявление источников инструментальной погрешности измерения, оценка их влияния, изменение конструкции приспособления при необходимости.

3. Расчет себестоимости воспроизведения конструктивных элементов деталей приспособления, влияющих на точность измерения в зависимости от назначаемых допусков.

4. Оптимизация допусков с целью нахождения такого их сочетания, которое обеспечит требуемую точность измерения при минимальной общей себестоимости изготовления деталей.

В работе проиллюстрировано решение второго и третьего этапа задачи оптимизации допусков на

простейшем примере контрольного приспособления для измерения полного радиального биения (рисунок 1). Размеры деталей приспособления зависят от габаритов контролируемой детали. Расстояние между центрами должно быть достаточным для размещения самой длинной детали, а высота опор – для установки деталей максимального диаметра.



$L_{оц1}$ и $L_{оц2}$ – длины оснований стоек центров, мм;
 $L_{ос}$ – длина основания колонки, мм;
 $L_к$ – длина кронштейна, мм; $L_н$ – длина детали, мм;
 $L_б$ – расстояние между центрами, мм

Рисунок 1 – Схема измерения полного радиального биения

Источники погрешностей, обусловленные схемой приспособления:

1. Отклонение от соосности конической и цилиндрической поверхностей центров.
2. Зазоры между центрами и отверстиями стоек центров.
3. Разновысотность стоек центров.
4. Отклонение от плоскостности базовых поверхностей стоек центров.
5. Отклонение от плоскостности плиты.
6. Отклонение от плоскостности основания колонки для измерительной головки.
7. Отклонение от перпендикулярности колонки основанию.
8. Отклонение от прямолинейности оси колонки.
9. Отклонение профиля продольного сечения отверстий в кронштейне.
10. Отклонение от параллельности отверстий в кронштейне.

Параметры схемы приспособления приняты из расчета размеров детали, длиной 100 мм.

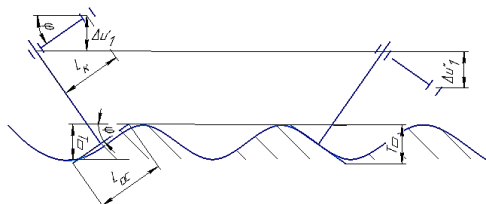


Рисунок 2 – Перекос колонки с измерительной головкой из-за отклонения от плоскостности плиты

Для анализа отдельных элементарных источников погрешностей использован геометрический метод, который предполагает построение

схем, иллюстрирующих как каждая погрешность (линейное смещение или перекося) влияет на результат измерения биения.

В качестве примера приведена схема и расчет влияния отклонения от плоскостности плиты на положение колонки с измерительной головкой (рисунок 2).

$$T_p = L_{ос} * \sin \varphi,$$

$$\Delta'_{и1} = L_к * \sin \varphi =$$

$$L_к * \sin(\arcsin \frac{T_p}{L_{ос}}) = L_к * \frac{T_p}{L_{ос}} = \frac{L_к}{L_{ос}} * T_p,$$

$$\Delta'_{и1} = \Delta'_{и2},$$

$$\Delta_{и1} = \sqrt{2} \frac{L_к}{L_{ос}} * T_p,$$

где T_p – допуск плоскостности рабочей поверхности плиты;

$\Delta'_{и1}$ – погрешность, связанная с подъемом измерительной головки из-за отклонения от плоскостности рабочей поверхности плиты;

$\Delta'_{и2}$ – погрешность, связанная с опусканием измерительной головки из-за отклонения от плоскостности рабочей поверхности плиты;

φ – угол отклонения кронштейна относительно номинального положения.

На отклонения геометрических параметров, которые были определены как источники погрешностей измерения, назначены допуски различных уровней точности.

Для оценки влияния точности изготовления деталей на их стоимость использована методика укрупненного расчета технологической себестоимости. Ниже приведены результаты получения зависимости стоимости обработки плиты от допуска плоскостности (таблица 1, рисунок 3).

В расчете технологической себестоимости учтены элементы деталей, которые непосредственно влияют на суммарную погрешность измерений: длина плиты и ее ширина.

Таблица 1 – Технологическая себестоимость реализации допуска плоскостности плиты

технологический процесс	основное время T_o (час)	стоимость С (у.е.)
Фрезеровать начерно	0,052	4,133
Фрезеровать начисто	0,074	5,905
Фрезеровать тонко	0,108	8,611
Шлифовать начерно	0,010	1,559
Шлифовать начисто	0,017	2,494
Шлифовать отделочно	0,027	3,990

Технологический процесс состоит из операций: фрезеровать начерно, фрезеровать начисто, фрезеровать тонко, шлифовать начерно, шлифовать начисто, шлифовать отделочно и позволяет получить отклонение от плоскостности плиты разной точности, от 120 мкм до 12 мкм по ГОСТ 24643.

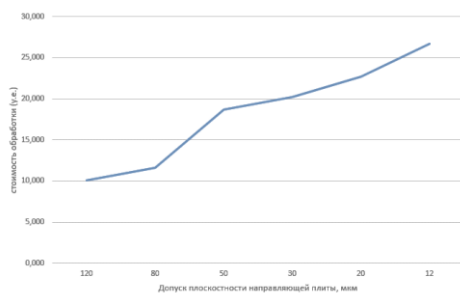


Рисунок 3 – Зависимость стоимости обработки плиты от допуска плоскостности

Фрезерование производится на вертикально фрезерном станке, шлифование – на плоскошлифовальном станке.

Для расчета основного машинного времени использовались типовые параметры обработки. Суммарная стоимость обработки составила 26,692 у.е.

Полученные модели оценки влияния отклонений параметров деталей на погрешность измерения и зависимости «уровень точности – стоимость» являются основой для оптимизационного расчета допусков, минимизирующего общую стоимость изготовления приспособления.

УДК 621.317

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

Старовойтова В. Г., Серенков П. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются современные научные и методические основы совершенствования метрологического контроля преобразователей термоэлектрических (ПТ) с позиций системного подхода. Проведен анализ типовых источников погрешностей, организационных и технических барьеров, детально рассмотрены пути повышения точности и достоверности измерений. Описана структура многоуровневой модели контроля, включающая классификацию средств измерений, разработку новых и адаптацию существующих методик калибровки и поверки, повышение требований к сопровождению документации и управлению данными, а также внедрение непрерывного профессионального обучения специалистов. Представлены рекомендации по реализации предложенной модели на различных этапах жизненного цикла ПТ, включая этапы проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания. Рассмотрен опыт внедрения и типовые трудности при апробации новых решений в реальных промышленных условиях.

Ключевые слова: преобразователи термоэлектрические, метрологический контроль, калибровка, поверка, погрешность измерений, управление данными, повышение квалификации, промышленная валидация, системный подход.

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL IMPROVEMENT OF THE METROLOGICAL CONTROL OF THERMOELECTRIC TRANSDUCERS

Starovoitova V. G., Serenkov P. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper examines modern scientific and methodological foundations for improving the metrological control of thermoelectric transducers (TET) from a systems approach perspective. An analysis of typical sources of errors, as well as organizational and technical barriers, is provided, with detailed consideration of methods for enhancing measurement accuracy and reliability. The structure of a multi-level control model is described, which includes the classification of measuring instruments, the development and adaptation of calibration and verification procedures, enhanced requirements for documentation and data management, and the implementation of continuous professional training for specialists. Recommendations are given for implementing the proposed model at various stages of the TET life cycle, including design, production, operation, and technical maintenance. The experience of implementation and typical challenges encountered during the testing of new solutions in real industrial settings are discussed.

Keywords: thermoelectric transducers, metrological control, calibration, verification, measurement error, data management, qualification improvement, industrial validation, systems approach.

Адрес для переписки: Старовойтова В. Г., ул. К. Минина, 2, 103, г. Минск 220014, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Актуальность и проблема:

Преобразователи термоэлектрические (ПТ) играют определяющую роль в системах промышленного контроля температуры, обеспечивая точность и непрерывность измерений на всех этапах технологических процессов. Современные направления

автоматизации, переход к концепции промышленного производства «Индустрии 4.0», рост требований к энергоэффективности и безопасности требуют от ПТ не только повышенной точности, но и полной прослеживаемости результатов измерений. Таким образом, актуальной задачей становится

обеспечение высокого уровня метрологического контроля, позволяющего минимизировать ошибки и предотвращать отказ оборудования по причине некорректных показаний ПТ.

Выделяются основные группы проблем:

– Технические: старение чувствительных элементов и термоэлектродов, отклонения в физико-химических свойствах материалов, снижение точности из-за ослабления и окисления контактов, воздействие электромагнитных помех и неучет влияния окружающей среды.

– Организационно-технические: недостаточное соблюдение процедур калибровки и поверки, отсутствие унифицированного документационного контроля, неоднородность применяемых методик на различных этапах эксплуатации ПТ.

В докладе обоснованы пути решения проблем:

Внедрение системного многоуровневого подхода, который предполагает поэтапное совершенствование всего комплекса работ по метрологическому контролю с учетом специфики разных типов ПТ и особенностей производственных процессов. Модель реализации подхода включает все стадии жизненного цикла ПТ: от проектирования и производства до эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Классификация ПТ и адаптация процедур.

В докладе предложена детальная классификация средств по:

- типу термоэлектродов (К, J, S и др.);
- диапазону температур (стандартные, высокотемпературные, криогенные);
- критичности применяемых узлов (безопасность, производственные параметры, лабораторные задачи).

Для каждой категории ПТ сформированы рекомендации по выбору и параметрам эталонов, особенностям калибровочных процедур и частоте поверок.

Оптимизация и стандартизация методик калибровки и поверки.

Приведены рекомендации по внедрению методик калибровки максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, включая имитацию нагрузки и учет комплексных воздействий (влажность, вибрация, колебания температуры окружающей среды). Поверку рекомендуется проводить с использованием современных эталонов и автоматизированных установок с обязательной оценкой полной неопределенности результата. Предлагается использование программных модулей, автоматически рассчитывающих и архивирующих данные о каждом проходе процедуры.

Для прозрачности, унификации и воспроизводимости требуется стандартизировать формы протоколов и цифровое сопровождение процедур. Документация должна содержать исчерпывающие сведения о:

- типах и сериях использованных эталонов;
- условиях проведения калибровки и поверки;
- показателях неопределенностей и анализе факторов риска;

- статистике отказов и дефектов за выбранный период.

Внедрение электронных журналов и интеграция учета с промышленными MES/ERP-системами позволяют проводить аналитику, отслеживать инновации и автоматизировать планирование последующих проверок.

Непрерывное повышение квалификации персонала.

Установлено, что одной из основных проблем является редкое обновление знаний по современным стандартам и методикам. Предлагается организовать:

- регулярные внутренние тренинги и внешнее обучение с участием сертифицированных преподавателей;

- вовлечение специалистов в тематические семинары и научно-технические конференции.

В докладе сформулированы практические рекомендации по внедрению:

комплекс мероприятий по переходу к многоуровневой модели метрологического контроля должен включать:

- проведения периодического аудита действующих методик и состояния парка ПТ;

- внутренних стандартов и инструкций по калибровке и поверке для всех классов термоэлектрических преобразователей;

- интеграции модулей учета и анализа в существующую информационную инфраструктуру предприятия;

- постоянного совершенствования программы обучения и аттестации ответственного за метрологию персонала.

Идентифицированы проблемы внедрения рекомендаций и пути их преодоления:

Например, на этапе апробации и масштабирования системы могут встречаться:

- сопротивление персонала изменению устоявшихся процедур;

- несовместимость старого оборудования с новым программным обеспечением.

Для минимизации рисков рекомендуется реализация новых проектов, привлечение руководителей подразделений, проведение обучающих сессий по преимуществам новых подходов, а также постепенная техническая модернизация с учетом имеющихся бюджетов.

Выводы: Реализация системного, стандартизированного и цифрового подхода к метрологическому контролю ПТ должна способствовать не только существенному повышению точности и достоверности измерений, но и формированию единой информационной среды для анализа и прогнозирования технических рисков.

Литература

1. ГОСТ Р 8.585-2011. Государственная система обеспечения ЕИ. Термодары. Методика поверки. – Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 32 с.

2. СТБ ISO 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 01.01.2016. – Мн.: БелГИСС, 2015. – 36 с.

3. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. – Geneva: ISO, 2017. – 30 p.

4. Сивохин, Д. В. Термопары: теория, свойства, применение / Д. В. Сивохин, Ю. Г. Кривошеев. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 288 с.

5. Кузьмичев, Ю. Ю. Метрологическое обеспечение и контроль точности / Ю. Ю. Кузьмичев. – СПб.: Питер, 2014. – 320 с.

УДК 53.082.54

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ШУМ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Степура В. С., Виноградова А. В., Исаевич А. В.

Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь

Анотация. Проведена оценка относительного шума интенсивности лазерных источников с распределенной обратной связью на длинах волн 1310, 1490, 1550, 1625 нм. Установлена зависимость положения резонансного пика релаксационных колебаний от длины волны и мощности излучения в диапазоне от 0,5 до 9 мВт. Проведена оценка отношения сигнал/шум при мощности излучения 1 мВт. Выполнена проверка стабильности выходной мощности источников излучения.

Ключевые слова: относительный шум интенсивности, релаксационные колебания, лазерный источник.

RELATIVE INTENSITY NOISE OF DISTRIBUTED FEEDBACK LASERS

Stepura V. S., Vinogradova A. V., Isaevich A. V.

The State Scientific Institution

“B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus”,
Minsk, Belarus

Abstract. The relative intensity noise of laser sources with distributed feedback was estimated at wavelengths of 1310, 1490, 1550, and 1625 nm. The dependence of the resonance peak position of relaxation oscillations on wavelength and radiation power was determined in the range from 0.5 to 9 mW. The signal-to-noise ratio was estimated at a radiation power of 1 mW. The stability of the output power of the radiation sources was tested.

Keywords: relative intensity noise, relaxation oscillations, laser source.

Адрес для переписки: Степура В. С., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: v.stepura@ifanbel.bas-net.by

Введение. Качество и производительность оптических систем связи в значительной степени зависят от свойств используемых лазерных источников. Для повышения скорости передачи данных в таких системах необходимо использовать лазеры с определенными шумовыми характеристиками. Важной характеристикой шума интенсивности (флуктуаций мощности оптического излучения) лазера является относительный шум интенсивности (RIN), который представляет собой шум мощности излучения, нормализованный к среднему уровню мощности и приведенный к единичной полосе частот [1]:

$$R(f) = \frac{\langle \Delta P(f)^2 \rangle}{\langle P(f)^2 \rangle} \cdot \frac{1}{\Delta f}, \quad (1)$$

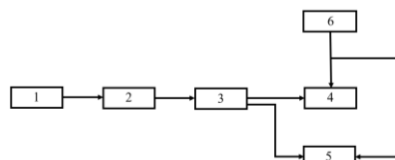
где $R(f)$ – RIN, $\langle \Delta P(f)^2 \rangle$ – среднеквадратичные флуктуации средней мощности излучения, $\langle P(f)^2 \rangle$ – среднеквадратичная мощность излучения, Δf – единичная полоса частот.

Цель данной работы – исследование и сравнительный анализ уровня RIN лазерных источников с распределенной обратной связью на длинах волн 1310, 1490, 1550, 1625 нм.

Материалы и методы. На рисунке 1 представлена блок-схема установки для измерений относительного шума интенсивности лазеров в режиме реального времени в полосе частот от 100 МГц до

40 ГГц. Излучение испытуемого лазера 1, ослабленное, при необходимости, с помощью оптического аттенюатора 2, подается на высокочувствительный малошумящий приемник SYCATUS A0010A-040 3, который преобразует оптическое излучение в усиленный электрический сигнал. Постоянная составляющая фототока, выработанного детектором приемника излучения при попадании на него излучения испытуемого лазера, поступает с делителя электрического сигнала на цифровой мультиметр KEYSIGHT 34461A 5, в то время как переменная составляющая электрического шума усиливается и затем измеряется анализатором сигналов KEYSIGHT MXA N9020B 4.

Управление установкой, сбор и обработка данных производится с помощью специально разработанного программного обеспечения 6.



1 – испытуемый лазер; 2 – оптический аттенюатор,
3 – приемник излучения; 4 – анализатор сигналов;
5 – цифровой мультиметр; 6 – ПО

Рисунок 1 – Блок-схема установки для измерений RIN

Результаты. Измерения проводились с использованием высокостабильных лазеров с распределенной обратной связью, входящих в состав источников излучения FTBx-2150-2346B-4 фирмы EXFO и БСИ-5 ЗАО «Институт информационных технологий», генерирующих узкополосное излучения на длинах волн 1310, 1490, 1550 и 1625 нм.

На рисунке 2, а представлены частотные зависимости RIN лазеров FTBx-2150-2346B-4 для мощности излучения 1 мВт при различных длинах волн излучения, а на рисунке 2, б аналогичные зависимости для лазеров БСИ-5. Видно, что зависимости для всех лазеров имеют одинаковый вид: сначала с возрастанием частоты происходит увеличение RIN, достигая своего максимума при частотах, соответствующих частотам релаксационных колебаний, а затем снова уменьшается на более высоких частотах. Максимальное значение $RIN = -127$ дБ/Гц имеет лазер с длиной волны 1550 нм источника БСИ-5 на частоте 6,5 ГГц. Наилучшие максимальные значения $RIN = -137$ дБ/Гц имеют лазеры с длинами волн излучения 1490 и 1550 нм на частотах 7,9 и 8,6 ГГц соответственно.

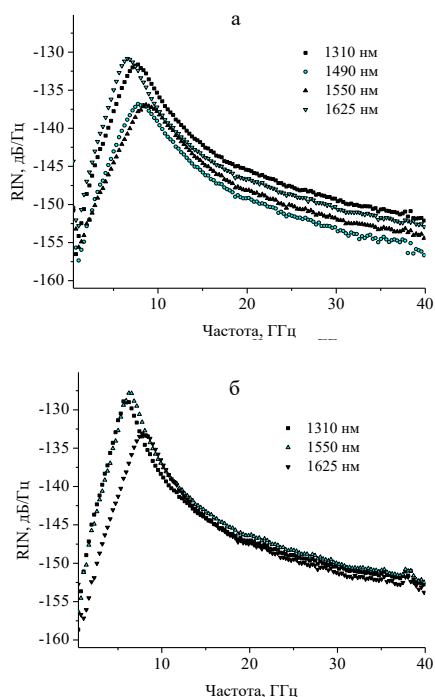


Рисунок 2 – Частотные зависимости RIN лазеров источника FTBx-2150-2346B-4 (а) и БСИ-5 (б)

В таблице 1 представлены результаты измерений RIN на частотах релаксационных колебаний и значения этих частот лазера с длиной волны 1310 нм источника FTBx-2150-2346B-4 при различных значениях выходной мощности лазера. С увеличением мощности излучения наблюдается смещение максимума частотных зависимостей RIN в область более высоких частот, сопровождаемое монотонным снижением значений RIN. Аналогичная зависимость наблюдается для всех лазеров обоих источников. Например, для лазера

с длиной волны 1310 нм источника БСИ-5 с увеличением выходной мощности с 1 до 9 мВт происходит уменьшение RIN с -129 до -147 дБ/Гц.

Проведенные выше исследования проводились при работе лазеров в режиме непрерывной генерации излучения. Модуляция излучения с частотами от 270 Гц до 2 кГц вызывала увеличение RIN. Например, для лазера с длиной волны излучения 1310 нм источника FTBx-2150-2346B-4 значение RIN при максимальной выходной мощности 3 мВт составляло $-134,5$ дБ/Гц, а при модуляции излучения: -130 дБ/Гц при всех частотах модуляции.

Таблица 1 – Значения RIN и частоты релаксационных колебаний при изменении выходной мощности лазера

Мощность, мВт	0,5	1	1,5	2	2,5
RIN, дБ/Гц	–115	–123	–127	–130	–133
Частота, ГГц	3,6	5,0	6,2	7,0	7,9

Измерение отношения сигнал/шум проводилось с использованием интерполяционного метода в соответствии с [2]. При увеличении мощности излучения лазеров от 0,5 до 2,5 мВт отношение сигнал/шум увеличивается с 36 до 50 дБ для всех лазеров источника FTBx-2150-2346B-4. Для лазеров источника БСИ-5 происходит увеличение отношения сигнал/шум от 44 до 55 дБ с ростом мощности излучения.

Проведенная оценка средневременной стабильности мощности излучения лазеров (на основании 600 измерений мощности в течении 1 мин.) в соответствии с [1] показала, что относительная флуктуация мощности лазеров FTBx-2150-2346B-4 и БСИ-5 не превышает 0,15 % и 0,05 %, соответственно, что свидетельствует о высокой стабильности исследуемых источников.

Вывод. Проведенные исследования демонстрируют наличие зависимости RIN лазеров с распределенной обратной связью от длины волны и уровня мощности излучения. Полученные результаты подтверждают, что с увеличением мощности излучения максимальные значения RIN на частотах релаксационных колебаний уменьшаются в результате квадратичной зависимости от плотности фотонов в резонаторе, при этом значения частоты релаксационных колебаний увеличиваются, что позволяет в будущем оптимизировать режимы работы лазеров.

Литература

1. СТБ ISO 11554-2020. Оптика и фотоника. Лазеры и относящиеся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения мощности, энергии и временных характеристик лазерного излучения. – Введ. 01.01.2021. – Мн.: БелГИСС, 2020. – 24 с.
2. IEC 61260-2-9:2009. Fibre optic communication subsystem test procedures – Part 2-9: Digital systems – Optical signal-to-noise ratio measurement for dense wavelength-division multiplexed systems. – Geneva: IEC, 2009. – 24 p.

УДК 531.717.1

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОЗЫРЕК ЛЕВЫЙ»

Хадыков М. Т., Соколова Ю. А.

ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления», Улан-Удэ, Россия

Аннотация. В работе проанализирована конструкторская и технологическая документация на деталь «Козырек левый». Разработана конструкторская и технологическая документация на единичное средство контроля для повышения качества продукции.

Ключевые слова: шаблон, средство измерения, средство контроля, козырек левый, техническая документация.

METROLOGICAL SUPPORT FOR THE MANUFACTURE OF THE PART "KOZIREK LEVIY"

Khadykov M. T. Sokolova Y. A.

FSBEI HPE "East Siberia State University of Technology and Management", Ulan-Yde, Russia

Abstract. The work analyzes the design and technological documentation for the part "Kozirek leviy". Design and technological documentation for a single control tool for improving product quality has been developed.

Keywords: template, measuring instrument, control instrument, left visor, technical documentation.

Адрес для переписки: Соколова Ю. А., ул. Ключевская, 40В, стр. 8, г. Улан-Удэ 670013, Россия
e-mail: yuliya.niedetzky@yandex.ru

Предприятие ООО «Аэроком» создан в июле 2020 года на базе производственных площадей Улан-Удэнского авиационного завода, основанного в 1939 году. «Аэроком», в прошлом 58 цех Улан-Удэнского авиационного завода, занимается выпуском деталей из композитного материала, применяемых в конструкции вертолетов типа МИ-8 АМТ, МИ-8 АМТШ. С 2022 года ООО «Аэроком» начал освоение новой тематики, актуальной в настоящих мировых условиях: занимается производством и испытанием беспилотных воздушных судов. Предприятие производит беспилотные летательные аппараты различных типов, например «Буря-10».

На основании договора предприятие разрабатывает детали и узлы для авиационного завода. К продукции из полимерного композиционного материала для вертолетов МИ-8 относятся: обтекатели, козырьки, двери, крышки, люки и т.д.

Целью работы является улучшение качества производства «Козырька левого», который является частью приборной панели пилота вертолета МИ-8АМТШ.



Рисунок 1 – Беспилотный летательный аппарат «Буря-10»

Задачи работы: разработка технической документации на единичное средство контроля и расчет себестоимости разрабатываемого изделия.

Актуальность работы заключается в повышении качества крепления козырька к приборной доске, для лучшей видимости летчиком приборов.

Во время метрологического анализа технологической и конструкторской документации «Козырька левого» было выявлено, что не контролируются определенные поверхности, что приводит к смещению отверстий козырька с приборной панели.

В данной статье были представлены часть расчетов, наиболее точно характеризующих точность шаблона.

Для контроля данных поверхностей был разработан шаблон и техническая документация.

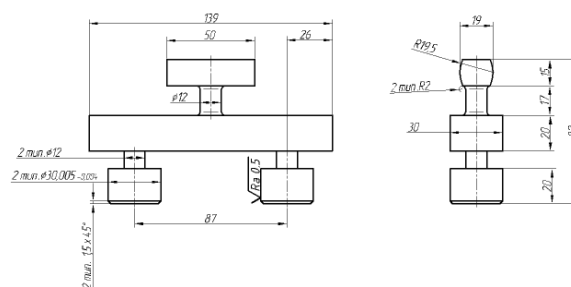


Рисунок 2 – Шаблон

Шаблон предназначен для контроля размера отверстий и межосевого расстояния.

Марка материала У8.

Максимальный предельный диаметр отверстия рассчитывается по формуле 1.

$$D_{max} = D + ES, \quad (1)$$

где D_{max} – наибольший размер отверстия, мм;
 ES – верхнее предельное отклонение размера отверстия.

Максимальный предельный диаметр отверстия составил 30,033 мм.

Минимальный предельный диаметр отверстия рассчитывается по формуле 2.

$$D_{min} = D + EI, \quad (2)$$

где D_{min} – наименьший размер отверстия, мм;
 EI – нижнее отклонение размера отверстия.

Таблица 1 – Себестоимость шаблона

Статья затрат	Величина затрат, руб
Затраты на разработку средства контроля	2804,4
Затраты на материалы	210,25
Затраты на технологическую электроэнергию	395,1
Затраты на заработную плату работников	2297,9
Общепроизводственные расходы	1148,95
Общехозяйственные расходы	459,58
Внепроизводственные расходы	45,96
Итого	7362,14

Минимальный предельный диаметр отверстия составил 30 мм.

Масса изделия составляет 0,4165 кг.

Расчеты метрологических характеристик производились по эмпирическим формулам.

Для расчета надежности шаблона были выбраны следующие показатели надежности:

- максимальное напряжение = 3,315 кг/с;
- момент сопротивления сечения = 5 мм;
- прочность = 0,663 МПа;
- работоспособность = 1229,337 ч;
- сопротивление конструкции = 1230 МПа;
- нагрузочный эффект = 0,663 МПа;
- безотказность работ = 0,6 P(t);

– ремонтпригодность = 0,086 МТТР;

– долговечность = 10,59 ч.

Во время проектирования технологической документации на шаблон было подсчитано экономическое обоснование разработки.

В ходе экономических расчетов на шаблон была рассчитана себестоимость средства контроля и пранализирована эффективность выпуска данного изделия для предприятия. Выпуск шаблона считается экономически целесообразным.

Благодаря разработанному единичному средству контроля обеспечивается точность изготовления и установки на этапе производства, позволяющее сократить расходы сырья, оборудования и времени, что сказывается на стабильности сборочного процесса.

Литература

1. Об обеспечении единства измерений: Федер. закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 26, ст. 3021. – URL: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.php?nb=100&issid=1002008026000&docid=2> (дата обращения: 20.06.2025).
2. ГОСТ 24853-81. Калибры гладкие для размеров до 500 мм. – Введ. 01.01.1983. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020571> (дата обращения: 20.06.2025).
3. ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки. – Введ. 01.07.1983. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012221> (дата обращения: 20.06.2025).
4. Обработка металлов резанием: справ. технолога / под ред. А. А. Панова. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2006. – 944 с.
7. Нормоконтроль курсовых, дипломных проектов (работ), отчетов по производственной практике. Общие требования и правила оформления: метод. пособие / К. М. Хамханов, Д. Н. Хамханова, М. Т. Хадыхов. – Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2005. – 84 с.

УДК 006.91

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цитович Б. В., Соколовский С. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. На основании проведенного системного анализа функциональных возможностей различных чувствительных элементов средств измерений геометрических величин обоснована необходимость использования общих подходов к проектированию таких элементов, связанных с оцениванием ожидаемых погрешностей.

Ключевые слова: геометрические величины, средства измерений, чувствительные элементы, рекомендации по проектированию.

ANALYSIS OF THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF SENSITIVE ELEMENTS OF MEASURING INSTRUMENTS FOR GEOMETRIC QUANTITIES

Tsytoovich B. V., Sokolovsky S. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Based on the conducted systems analysis of the functional capabilities of various sensitive elements of measuring instruments for geometric quantities, the need to use common approaches to the design of such elements associated with the assessment of expected errors is substantiated.

Keywords: geometric quantities, measuring instruments, sensitive elements, design recommendations.

*Адрес для переписки: Соколовский С. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: s.s.sokolovsky@gmail.com*

Чувствительным элементом измерительного прибора или измерительной цепи канала измерительной установки или системы в классической метрологии называют ту составную часть первичного измерительного преобразователя, которая непосредственно взаимодействует с объектом измерения для получения от него первичного сигнала измерительной информации. Определение, приведенное в РМГ 29, в котором совершенно неправомерно объединены такие три термина как «чувствительный элемент», «первичный измерительный преобразователь» и «датчик» [1], по сути, опровергается приведенными там же примерами.

Большое разнообразие чувствительных элементов наблюдается в измерительных каналах средств измерений (СИ) геометрических величин. Среди них есть как одиночные, так и парные элементы, например, рабочая поверхность щупа трехкоординатного прибора, две пятки гладкого микрометра, две губки штангенциркуля. У нутромера могут быть два или три контактных элемента, у специально разрабатываемых «многощуповых» СИ число чувствительных элементов ограничивается только конструктивными особенностями их многомерной измерительной головки.

Очевидной представляется попытка противопоставления контактных и бесконтактных элементов, например, оптическая ось визирного микроскопа или катетометра. При этом имеются также пневматические измерительные приборы, где роль чувствительных элементов играет воздушный поток, а также приборы, в которых наличие контакта щупа с объектом подтверждается замыканием электрической цепи. Бесчисленное разнообразие чувствительных элементов заставляет отвлекаться на попытки множественных классификаций, которые уводят от сути их функционального назначения и оценивания возможностей искажения информационного сигнала в измерительной цепи СИ. В частности, наличие механического контакта чувствительного элемента с объектом измерения при значительной измерительной силе может привести к деформациям объекта и/или СИ, износу чувствительного элемента, вплоть до потери точности при многократных измерениях. Поэтому гладкий микрометр и микрометрический глубиномер снабжают устройствами ограничения измерительной силы (например, храповой ограничитель вращающего момента под общепринятым названием «трещотка»). Для координатно-измерительных щупов СИ для решения задач ограничения измерительной силы были направлены значительные интеллектуальные ресурсы, в результате чего появились оригинальные конструкции щупов

фирмы «Ренишоу» и др. Весьма актуальной оказалась проблема ограничения измерительной силы для многощуповых СИ, что привело к появлению значительного числа оригинальных решений, включая «электронные индикаторы контакта» [2] и иные.

Чувствительные элементы средств измерений (СИ) геометрических величин отличаются рядом особенностей, связанных с геометрией объектов измерений и самих чувствительных элементов. Идеальная ситуация представляется как взаимодействие одной точки чувствительного элемента с одной точкой профиля объекта измерений при совпадении линии измерения с направлением измеряемого параметра. Однако реализация такой ситуации практически не представляется возможной из-за неидеальности объекта измерения и сложностей инструментальной реализации нужного направления линии измерения.

Геометрия щуповых чувствительных элементов в первом приближении направлена на создание точечного контакта: для измерения призматических деталей используют сферические наконечники, при измерении цилиндрических поверхностей деталей применяют ножевые наконечники, а для сферических объектов используют плоские контактные поверхности щупов. Однако в реальной ситуации приходится сталкиваться с необходимостью использования универсальных средств измерений. В результате гладкие микрометры используют для измерений цилиндрических поверхностей (контакт множества образующих детали с плоским наконечником). Ножевые рабочие поверхности штангенциркуля контактируют с плоскими гранями призматических деталей, а индикаторная скоба имеет два чувствительных элемента разных форм (сферический у наконечника индикатора и плоская пятка неподвижного элемента). Во всех рассмотренных случаях наблюдается попытка минимизировать зону контакта чувствительных элементов СИ и профиля или поверхности объекта измерения.

Картина принципиально изменяется при использовании «станковых СИ», например, измерительной головки, закрепленной в стандартной стойке. Такое станковое СИ имеет два чувствительных элемента: сферический у наконечника измерительной головки и плоскость рабочего стола стойки. Деталь устанавливают на рабочий стол стойки, при этом считают, что линия измерений направлена строго перпендикулярно плоскости рабочего стола. При измерении призматических деталей площадь их контакта с нижним чувствительным элементом приближается к

номинальной площади опорной поверхности детали, благодаря чему линия измерения фиксируется по отношению к этой поверхности. Площадь контакта детали с верхним чувствительным элементом приближается к точечной. Деталь ориентируется по нижнему чувствительному элементу при фиксированном направлении линии измерений.

При установке на рабочий стол стойки номинально цилиндрической детали ситуация отличается площадью контакта, которая для идеальной детали будет представлять собой линию.

Отсутствие однозначно направленной линии измерений характерно для контактных нутромеров со сферическими измерительными наконечниками. Для накладных нутромеров задачу «выхода в диаметрально плоскость круглого сечения» можно решить за счет использования центрирующего мостика, а для поиска наименьшего размера в продольном сечении применяют «покачивание прибора» в диаметральной плоскости. Задача усложняется при измерении параметров «призматического» отверстия (например, ширины паза). В таком случае центрирующий мостик не работает, а «покачивание прибора» последовательно осуществляют в двух перпендикулярных плоскостях, поочередно фиксируя найденные направления.

Приведенные примеры измерительных работ опираются на частные случаи их реализации. Представляется полезным рассмотреть обобщенные подходы к проектированию чувствительных элементов СИ геометрических величин. Обоб-

щенные подходы должны рассматривать возможности появления погрешностей от разных источников, а не только инструментальные погрешности. При необходимости разработки нестандартизованных СИ заказчика не должно волновать то обстоятельство, что конструктор не учел возможные методические составляющие погрешности измерений. В ряде случаев методические составляющие бывают обусловлены конструкцией применяемых СИ. В частности, изогнутость оси номинально цилиндрической поверхности не выявляется сколь угодно точным накладным прибором.

Разработчик СИ должен как минимум предупредить пользователя о «мертвых зонах» предлагаемого СИ, а это означает, что квалифицированное проектирование СИ геометрических величин, в частности разработка их чувствительных элементов, должно опираться на обобщенные подходы к проектированию таких элементов, необходимость разработки которых вытекает из проведенного анализа.

Литература

1. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 01.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
2. Соколовский, С. С. Специальные электроконтактные измерительные преобразователи / С. С. Соколовский, В. Л. Соломахо, Д. В. Соломахо // Метрология и метрологическое обеспечение: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / под общ. ред. В. Н. Корешкова [и др.]. – Мн.: БелГИМ, 2007. – С. 318–321.

УДК 006.91

МЕРЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СФЕРЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Цитович Б. В.¹, Соломахо В. Л.²

¹Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Меры, в зависимости от метода воспроизведения сигнала измерительной информации, полученного при ее использовании, целесообразно классифицировать на носителей и генераторов величин определенного размера, а также индикаторов достижения определенного размера величины. Рассмотрены возможности их использования и верификации, исходя из принадлежности мер к определенной классификационной группе.

Ключевые слова: верификация мер, виды мер, метрологические характеристики мер, применение мер.

MEASURES: CLASSIFICATION AND USE IN THE SPHERE OF LEGISLATIVE METROLOGY

Tsitovich B. V.¹, Solomakho V. L.²

¹Belarusian State Institute of Standardization and Certification

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Measures in accordance with the type of reproduction of the signal of measuring information can be classified into carriers and generators of quantities of a certain size, as well as indicators of reaching a certain size of the quantity. The possibilities of using and verifying measures based on their belonging to a certain classification group are considered.

Keywords: verification of measures, types of measures, metrological characteristics of measures, application of measures.

Адрес для переписки: Соломахо В. Л., ул. Я. Коласа, 22, 518, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: solomaho@bntu.by

Меры являются специфическими средствами измерений (СИ), используемыми для воспроизведения одной или ряда точек шкалы определенной физической величины. Отличительная особенность применения мер – отсутствие преобразования сигнала измерительной информации. В результате у меры отсутствует такая метрологическая характеристика, как чувствительность – отношение изменения показаний СИ к вызывающему его изменению измеряемой величины [1]. Поскольку чувствительность плохо увязывается с «цифровыми» СИ и с измерительными преобразователями, рациональнее говорить об отношении изменения сигнала на выходе измерительной цепи средства измерения к вызывающему его изменению сигнала на входе, что можно назвать коэффициентом преобразования сигнала.

Меру определенной физической величины используют для воспроизведения одной точки шкалы размеров этой величины (однозначная мера) или ряда точек (многозначная мера) в масштабе 1:1.

Многозначная штриховая мера длины (линейка, рулетка) имеет коэффициент преобразования, равный единице. То же самое можно сказать о штриховых мерах плоского угла (коэффициент преобразования угла равен единице) и штриховых мерах объема (преобразуют одну из линейных характеристик объема жидкости).

Определение меры (материальной), представленное в РМГ 29 [1], не охватывает все виды мер. Кроме мер, которые являются носителями величины определенного размера («постоянно хранят величины») и мер, которые являются генераторами величины определенного размера («воспроизводят величины в процессе использования»), существуют также меры-индикаторы [2].

Примерами мер первой группы являются гири (меры массы), плоскопараллельные концевые меры длины, угловые концевые меры и др. Эти меры воспроизводят величины «по требованию» в процессе использования, например, при измерении методом сравнения с мерой для настройки прибора сравнения (компаратора).

Меры, относящиеся ко второй группе, генерируют величины непосредственно в процессе использования. Примерами таких мер являются камертон (мера частоты колебаний), эталонные меры энергии сгорания (меры удельной энергии сгорания на основе твердых или жидких веществ, меры объемной энергии сгорания на основе газообразных углеводородов или природного газа) и другие.

От рассмотренных принципиально отличаются меры, предназначенные для индикации достижения физической величиной заданного размера. Эти меры настолько отличаются от других, что их основные признаки не попали в стандартное определение мер.

Мера-индикатор (физическое тело, изделие) не хранит и не воспроизводит нужную нам величину, она только фиксирует (подтверждает, сигнализирует) достижение воздействующей на нее физической величиной определенного значения. При этом генерируют (воспроизводят) интересующую нас физическую величину вспомогательные устройства, например, камера тепла и холода

Меры второй и третьей видов в процессе работы осуществляют преобразование энергии, но оно не является преобразованием сигнала измерительной информации, которое осуществляется в измерительных цепях преобразователей, приборов установок и систем.

Сигнал измерительной информации, полученный с использованием меры, может быть использован для настройки прибора на выбранную отметку шкалы, для наладки технологического оборудования, для измерений методом сравнения с мерой с применением прибора сравнения (компаратора) и для поверки средств измерений.

Наиболее часто меры применяют для собственно измерений при реализации метода сравнения с мерой («метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой»). Кроме того, аттестованные меры используют при поверке средств измерений. Сигнал, формируемый с помощью образцовой меры («эталонной меры», «эталона») имеет погрешность, которую можно считать пренебрежимо малой по сравнению с погрешностью поверяемого СИ. Для подтверждения этого факта проводят аттестацию (верификацию) образцовой меры.

В соответствии с РМГ 29, верификация есть «предоставление объективных свидетельств того, что данный объект полностью удовлетворяет установленным требованиям... Термины «поверка средства измерения» и «верификация», применительно к средству измерения, являются синонимами». Хотя положительные результаты поверки можно считать объективным свидетельством метрологической пригодности СИ для его использования при измерениях в сфере законодательной метрологии, поверку нельзя считать единственным способом ее верификация. Например, для мер состава вещества, которые также называют «стандартными образцами», верификация может осуществляться путем контроля технологии изготовления меры из верифицированных компонентов. Аналогичным путем может осуществляться верификация «образцов просвета», составляемых из верифицированных мер длины (набора подходящих концевых мер, притертых к плоской пластине и «накрытых» лекальной линейкой).

Эталонная мера энергии сгорания практически используется однократно, а потому не подле-

жит поверке перед настройкой по ней калориметра. Для подобных случаев применима «выборочная поверка», при которой о качестве подготовленной эталонной меры энергии сгорания судят по экспериментально оцениваемой выборке верифицированных мер. Аналогичные подходы могут применяться к «образцам состава» и некоторым другим мерам.

Метрологические характеристики меры, предназначенной для воспроизведения одной точки шкалы (однозначной меры), включают номинальное значение и характеристики погрешности его воспроизведения.

Нормируемые метрологические характеристики штриховых многозначных мер кроме номинальных значений и характеристик погрешностей воспроизведения дополняют еще рядом характеристик, непосредственно связанных со шкалой (в частности, пределы шкалы, диапазон шкалы, цена деления и длина деления шкалы). Диапазон измерений, диапазон преобразования и связанные с ними метрологические характеристики,

необходимые для измерительных цепей, к штриховым многозначным мерам не применяют.

Выводы.

1. Использование и верификация мер существенно отличается от процессов, применяемых для СИ, преобразующих информацию.

2. Отнесение мер к определенной классификационной группе определяет возможности их использования и верификации. Методики верификации разрабатывают с учетом особенностей воспроизведения измерительной информации, получаемой при использовании меры.

Литература

1. РМГ 29-2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 01.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.

2. Цитович, Б. В. Метрологические характеристики средств измерений, не преобразующих сигнал измерительной информации / Б. В. Цитович, В. Л. Соломахо // Приборостроение-2020 / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2020. – С. 217–219.

УДК 658.511.1

ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Черник М. О., Токар О. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Анотация. Изложены алгоритм действия по совершенствованию процесса управления рисками на предприятии с помощью построения функциональной модели процесса и модели оценки рисков.

Ключевые слова: риски, функциональная модель процесса, модель рисков, оценка рисков, реестр рисков.

OPTIMIZATION OF THE BUSINESS PROCESS OF RISK MANAGEMENT IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Chernik M. O., Tokar O. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents an algorithm of actions for improving the risk management process at an enterprise by constructing a functional model of the process and a risk assessment model

Keywords: risks, functional process model, risk model, risk assessment, risk register.

*Адрес для переписки: Токар О. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tokar.o@bntu.by*

Цель работы – в рамках комплексного информационно-методического обеспечения провести оптимизацию бизнес-процесса управления рисками и возможностями в системе менеджмента качества ОАО «МЗКТ». На ОАО «МЗКТ» внедрена система управления качеством на соответствия требованиям международного стандарта ISO 9001.

Данное предприятие является одним из ключевых предприятий отечественной машиностроительной отрасли, специализирующиеся на выпуске высокотехнологичной продукции гражданского и военного назначения.

Актуальность работы заключается в повышении эффективности системы менеджмента качества предприятия через внедрения современных подходов к управлению рисками [1].

Для достижения целей работы были поставлены следующие задачи:

1) построить и проанализировать функциональную модель процесса «Менеджмент рисков» в состоянии «Как есть» в нотации IDEF0;

2) построить функциональную модель бизнес-процесса в состоянии «Как надо» в нотации IDEF0;

3) построить модель оценки рисков;

4) разработать программное средство «Реестр рисков»;

5) построить и проанализировать «поток работ» в нотации BPMN;

6) произвести оценку результативности модели бизнес-процесса.

Построения функциональной модели в состоянии «Как есть» позволяет четко зафиксировать существующую структуру сети процессов предприятия, направленных на достижения целей в области качества, и определить:

- какие процессы и каких категорий реализуются на предприятии;
- как распределяются полномочия и ответственность за выполнения процессов;
- какие информационные объекты используются при выполнении процессов различного уровня детализации;
- как осуществляется обратная связь – корректирующие действия.

Функциональная модель в состоянии «Как есть» является отправной точкой для анализа потребностей предприятия, системы менеджмента качества, выявления проблем и «узких» мест.

Прежде всего создается контекстная диаграмма, которая определяет границы системы и ее взаимодействия с внешней средой.

Далее формируется модуль «Системный цикл PDCA». Назначение модуля – организационное проектирование инженерной составляющей системы менеджмента качества основного процесса со стороны владельца процесса для обеспечения стабильного выполнения показателей результативности и эффективности.

Модуль «Классический цикл PDCA» является логическим развитием диаграммы-модуля «Системный цикл PDCA».

Модуль «Поток работ» применяется для детализации комплексного процесса. Модуль реализован как поток последовательных процессов, связанных по типу «вход-выход».

Анализ функциональной модели «Как есть» показал следующие несоответствия:

- цель не соответствует точке зрения на контекстной диаграмме;
- не идентифицированы ответственные исполнители процессов в модуле «Системный цикл PDCA»;
- отсутствие выходов из функций в модуле «Классический цикл PDCA».

В результате анализа функциональной модели «Как есть» в соответствии со стандартом СТБ ISO 9001–2015 в модели «Как надо» учтены все корректировки и внесены в схему дополняющие изменения для результативного функционирования процесса.

После реструктуризации бизнес-процесса системы менеджмента качества были оценены риски на основе FMEA-анализа. Оценку проводили экспертным методом [2]. Для выявленных рисков были разработаны предупреждающие действия и внесены следующие изменения:

1) диаграмма А-0: актив «Ответственные должностные лица»; предупреждающие действия: ввести премии за доброкачественное выполнение функций; изменения в «Положение о премировании работников организации»;

2) диаграмма А3: актив «Владелец процесса»; предупреждающие действия: ввести премии за доброкачественное выполнение функций; подписать договор о финансировании курсов.

Традиционные методы учета рисков зачастую не обеспечивают достаточной прозрачности,

скорости обработки информации и точности анализа. Приложение «Реестр рисков» решает эти задачи благодаря автоматизации процессов регистрации, мониторинга и оценки рисков, централизованному хранению данных.

Средой для разработки программного средства являлась среда Microsoft Visual Studio, языком программирования был выбран объектно-ориентированный язык C#, для создания базы данных было использовано приложения Access.

После запуска программы пользователь получает доступ к главному меню, на котором расположены кнопки «База данных» и «Оценка рисков». При переходе на форму «База данных» пользователь получает доступ к базе данных, которая содержит и хранит в себе список зарегистрированных рисков предприятия. Также в базе данных регистрируются следующие записи:

- наименование риска;
- последствия риска;
- значимость риска;
- значимость последствия риска;
- возможные причины риска;
- вероятность возникновения риска;
- уровень риска;
- категория риска;
- принятия действия в отношении риска.

На форме «База данных» также расположен нужный функционал для работы с базой данных такой как «Загрузить» и «Удалить» информацию о риске. Форма «Оценка рисков» предоставляет доступ к нормативной и справочной информации, используемой в рамках стандарта предприятия СТБ СМК 01.03, а также расчет рисков (рисунок 1).

В ходе выполнения работы была подготовлена модель процесса «Поток работ» бизнес-процесса «Менеджмент рисков и возможностей». Она включает в себя последовательность действий, начиная с определения целей и текущего состояния, за которыми следует выполнение конкретных задач. Анализ «Потока работ» формирует четкое представление о последовательности действий, условиях перехода между этапами, точках принятия решений, об участниках, ответственных за выполнение операций. Визуальное представление в нотации BPMN помогает упростить коммуникацию между специалистами, устранить расхождения, в понимании процесса и создать единое информационное поле для дальнейшей работы.

Идентификатор	Наименование риска	Последствия	Значимость	Причины	Вероятность	Уровень	Категория	Действия
1	Некорректное исполнение работ	Повышение затрат	Высокая	Некорректное исполнение работ	Высокая	Высокая	Критическая	Внедрение системы контроля качества
2	Некорректное исполнение работ	Повышение затрат	Средняя	Некорректное исполнение работ	Средняя	Средняя	Важная	Внедрение системы контроля качества
3	Некорректное исполнение работ	Повышение затрат	Низкая	Некорректное исполнение работ	Низкая	Низкая	Незначительная	Внедрение системы контроля качества

Рисунок 1 – Форма оценки рисков в программном средстве «Реестр рисков»

Для оценки результативности модели был использованный экспертный метод оценки по определенной шкале оценивания результативности.

В итоге была получена удовлетворительная интегральная оценка результативности процесса «Менеджмент рисков и возможностей».

УДК 681.518.3

ПРОБЛЕМЫ И ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ТЕРМОПАР

Мороз А. С., Фролов Н. Н., Тявловский А. К., Ломтев А. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данном докладе рассмотрены ключевые проблемы и источники погрешностей, возникающие при использовании монолитных интегрированных измерителей сигналов термопар. Проанализированы влияние паразитных термоэлектрических эффектов, не идеальности встроенного опорного источника, нелинейности аналого-цифрового преобразователя и эффекта самопрогрева кристалла микросхемы. Показано, что для достижения высокой точности необходима комплексная калибровка и учет всех систематических погрешностей.

Ключевые слова: термопара, монолитный интегрированный измеритель, погрешность, измерение температуры, АЦП.

PROBLEMS AND ERRORS IN THE APPLICATION OF MONOLITHIC INTEGRATED THERMOCOUPLE SIGNAL METERS

Maroz A. S., Frolov N. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This report examines the key problems and sources of errors that arise when using monolithic integrated thermocouple signal meters. The influence of parasitic thermoelectric effects, the imperfection of the built-in reference source, the nonlinearity of the analog-to-digital converter and the effect of self-heating of the chip crystal are analyzed. It is shown that in order to achieve high accuracy, complex calibration and consideration of all systematic errors are necessary.

Keywords: thermocouple, monolithic integrated meter, error, temperature measurement, ADC.

*Адрес для переписки: Мороз А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru*

Современные монолитные интегральные нормирующие преобразователи, такие как E931.08, MAX31856, ZSSC4175, MCP9604 и аналоги, предназначенные для работы с термопарами, существенно упрощают построение измерительных систем. Они интегрируют в себе усилитель, источник опорного напряжения и датчик температуры для компенсации холодного спая, АЦП и интерфейс связи. Однако их применение сопряжено с рядом проблем, ограничивающих достижение максимальной или сопоставимой точности по сравнению с термометрами сопротивления, особенно в прецизионных применениях.

Основные источники погрешностей монолитных измерителей:

- Погрешность компенсации холодного спая. Встроенный датчик температуры для компенсации холодного спая измеряет температуру вблизи выводов кристалла, а не непосредственно в точке подключения термопары. Разница между температурой кристалла и температурой медных контактов клеммного соединения создает основную погрешность. На данный параметр влияют: нагрев микросхемы от собственной мощности рассеяния; тепловой поток от окружающих компонентов или воздушных потоков; несовершенство теплового контакта между кристаллом и корпусом микросхемы.

- Паразитные термо-ЭДС. Входные цепи усилителя критичны к возникновению паразитных термоэлектрических эффектов на контактах разнородных металлов (например, выводы микросхемы – дорожки печатной платы). Эти ЭДС, составляющие единицы–десятки микровольт, соизмеримы с сигналом термопары при малых перепадах температур и создают значительную погрешность при измерении низких температур [1].

- Погрешность встроенного опорного источника. Точность абсолютных измерений напрямую зависит от стабильности и точности внутреннего источника опорного напряжения (ИОН). Его начальный разброс и дрейф от температуры и времени вносят систематическую ошибку в результат преобразования.

- Нелинейность аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Хотя передаточная термоЭДС характеристика термопары нелинейна, монолитные измерители часто линейризуют ее программно, однако нелинейность самой характеристики АЦП, особенно интегральных преобразователей типа «дельта-сигма», добавляет собственную погрешность, которую невозможно устранить простой калибровкой в одной точке.

- Влияние синфазного напряжения и помех. Несмотря на высокий коэффициент подавления синфазного сигнала (КОСС) современных усили-

телей, наличие промышленных помех и синфазных напряжений на длинных проводах термопары может привести к искажению полезного сигнала и увеличению шумов [2].

Для повышения точности измерений необходимо применять комплекс мер:

- Тепловая изоляция корпуса микросхемы от источников тепла и обеспечение равномерного температурного поля вокруг зоны компенсации холодного спая.

- Симметричная разводка входных цепей на печатной плате и использование термостабильных материалов для минимизации паразитных термо-ЭДС [3].

- Системная калибровка всего измерительного тракта, включая компенсацию нелинейности, в нескольких температурных точках [3].

- Экранирование и использование витых пар проводов термопары для подавления синфазных помех.

Монолитные интегральные преобразователи с программной линеаризацией термоЭДС термопар, все-же остаются крайне нишевыми изделиями и не могут обеспечить погрешность измерения лучше 4–7 °С. Аналоговая компенсация термоЭДС термопар, ухудшает погрешность до 7–20 °С.

Нормирующие преобразователи, выполненные на основе дискретных элементов, с программной обработкой измерений, могут предложить погрешность измерения температуры

порядка 0,5–2 °С что гарантирует гибкость применения измерительной системы, получения высокоточной и достоверной информации о температуре измеряемого объекта.

Закключение. Применение монолитных интегрированных измерителей сигналов термопар позволяет создать компактные и позволяет добиться повышения надежности измерительной системы и увеличивает доверительную выборку результатов измерений при длительной работе. Комплексный подход к проектированию измерительного тракта и последующая системная калибровка являются обязательными условиями для получения высокоточной и достоверной информации о температуре. Но монолитные интегральные преобразователи, все же остаются крайне нишевыми и специализированы типами изделиями не могут обеспечить высокую точность.

Литература

1. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар: справ. / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М.: Металл, 1983. – 360 с.
2. Практические советы по измерению температуры // Keysight Technologies: [сайт]. – URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06821/application-notes/5992-4013.pdf> (дата обращения: 20.09.2025).
3. Мороз, А. С. Повышение точности и надежности нормирующего преобразователя сигналов термопар / А. С. Мороз, А. К. Тявловский // Приборостроение-2021: материалы конф., Минск, 2021 г. / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2021. – С. 114–116.

СЕКЦИЯ 5. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 620.179.161. 534.1

ДИСТАНЦИОННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ
ВРАЩАЮЩИМИСЯ МОДАМИ

Баев А. Р., Воробей А. В., Асадчая М. В., Гиль Н. Н.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Аннотация. Развита предложенный ранее нами способ акустического контроля объектов с криволинейной поверхностью путем их дистанционного прозвучивания и использования возбуждаемых вращающихся мод для обнаружения поверхностных дефектов типа трещина, расположенных на цилиндрических объектах. При этом, контактирующая с объектом и средствами акустических измерений подложка играет роль «своеобразной» временной задержки. Выявлены оптимальные условия достижения максимальной чувствительности контроля трещин разной ориентации в зависимости от частоты волны, радиуса цилиндрического образца и геометрии его контактного слоя. Определены режимы прозвучивания объекта и даны рекомендации для использования предложенного способа акустических измерений.

Ключевые слова: дистанционный способ ультразвукового контроля, вращающиеся упругие моды, выявление трещин.

REMOTE DETECTION OF SURFACE DEFECTS
USING ROTATING MODES

Baev A. R., Vorobey A. V., Asadchaya M. V., Gil N. N.

GNU "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, Belarus

Abstract. We have developed a previously suggested method for acoustic testing of curved objects using remote sounding and excited rotating modes to detect crack-type surface defects on cylindrical objects. The substrate in contact with the object and the acoustic measurement instruments acts as a kind of time delay. Optimal conditions for achieving maximum sensitivity in crack testing of various orientations have been identified, depending on the wave frequency, the radius of the cylindrical sample, and the geometry of its contact layer. Object sounding modes are determined, and recommendations for using the suggested acoustic measurement method are provided.

Keywords: distant ultrasonic testing, rotating elastic modes, crack detection.

Адрес для переписки: Воробей А. В., ул. Советская, 4, г. Минск, 220030 Республика Беларусь
e-mail: vorobey@belgazstroy.by

Повышение производительности и надежности неразрушающего контроля объектов, имеющих криволинейную поверхность, включая цилиндрическую, сферическую и др., расположенных в труднодоступных местах, подверженных различным воздействиям, в том числе термическому и др., представляет интерес для ряда практических приложений [1, 2]. Для этого нами предложен способ контроля структуры и физико-механических свойств объектов с цилиндрической и сферической поверхностью [2], проводимого без непосредственного акустического контакта излучающего и приемного преобразователей (ПЭП) волн Рэлея с объектом контроля. Последние располагаются на твердом основании (подложке), служащей в качестве своеобразной акустической линии задержки между ПЭП и объектом контроля, в котором возбуждаются поверхностные вращающиеся (ПВ) моды, как показано на рисунке 1. При этом особенности изменения амплитудных, временных и др. параметров фиксируемого импульса (импульсов) ПВ моды, обтекающей неоднократно поверхность объекта, несут информацию о свойствах поверхности объекта контроля. Отметим, что полученные ранее результаты исследований [3, 4] позволили выявить ряд принципиальных особенностей

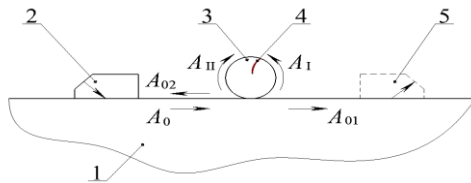
распространения ПВ мод как в цилиндрических, так и сферических образцах.

Цель настоящей работы заключается преимущественно в развитии упомянутого способа акустического контроля объектов с помощью ПВ мод на наличие в них поверхностных дефектов типа трещин, ориентированных в разных направлениях по отношению к оси цилиндра.

Объектом экспериментальных исследований служили цилиндрические стальные и алюминиевые образцы диаметром 10–25 мм. Рабочая частота возбуждаемых поверхностных волн варьировалась в диапазоне f , МГц = 1–5. Модельные трещины на образцах раскрытием $\sim 10^{-2}$ мм и глубиной до $\sim 0,500$ мм выполнены по специальной технологии в ИПФ НАН Беларуси кандидатом техническим наук, старшим научным сотрудником Деленковским Н. В.

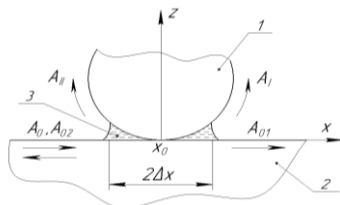
На основе представлений лучевой акустики (рисунок 2) предложена и апробирована качественная модель преобразования волн Рэлея в ПВ моды в области контакта образца с подложкой, позволившая выявить оптимальные условия прозвучивания объекта, существенно зависящая от безразмерных параметров, включая $x_R = \Delta x/R$ и $\lambda_R = \lambda/R$, где Δx – полуширина

контактного слоя, зависящая от радиуса цилиндра и объема контактной жидкости, а λ – длина волны в последней.



1 – подложка, 2 – излучающий, а 5 – принимающий УЗК пьезопреобразователь (ПЭП), 3 – образец с поверхностной трещиной 4

Рисунок 1 – Схема экспериментального исследования возбуждения и прохождения возбуждаемых вращающихся мод по поверхности цилиндрических образцов радиусом R с разной ориентацией трещин, используя для этого теневой и эхо-режим прозвучивания



1 – контролируемый объект; 2 – подложка; 3 – слой контактной смазки

Рисунок 2 – Экспериментальная схема, поясняющая способ возбуждения поверхностных вращающихся (ПВ) мод на объектах с цилиндрической и сферической поверхностью

Впервые экспериментально получены зависимости амплитуд поверхностных волн от x_R и λ_R , включая амплитуду отраженной волны Рэлея от зоны контакта цилиндра с подложкой (A_0) и проходящей на приемный ПЭП (A_{01}), а также – вращающихся мод – против часовой стрелки (A_I) и оппозитно ей (A_{II}). Показано, что зависимости A_I и A_{II} от x_R и λ_R имеют пологие максимумы, что позволяет надежно обеспечить требуемое качество акустического контакта и оптимальные условия для проводимых измерений. При этом, отношение $\varepsilon_A = A_I/A_{II}$ составляет $\sim 0,1$ и менее.

Установлено, что эффективность выявления ориентированных вдоль образующей поверхности цилиндра трещин (рисунок 3, *b*), определяемая коэффициентом ослабления амплитуды A_I импульса вращающейся моды согласно формуле $A_{I,n} = A_{I,1}/A_{I,n}$, как при реализации теневого, так и эхо режима прозвучивания, сравнима по величине, где n – количество раз обегания импульсом поверхности цилиндра (рисунок 3). В то же время следует отметить, что трещины, ориентированные преимущественно перпендикулярно образующей поверхности образца, выявляются именно при реализации теневого варианта измерений. Обнаруженный эффект

подобен эффекту ослабления акустического пучка продольной моды, распространяющейся через трещину, плоскость которой ориентирована преимущественно вдоль направления распространения волнового фронта [5]. При этом стоком энергии служит отходящая поперечная мода [1]. Для прояснения этого механизма требуется проведение дополнительных исследований.

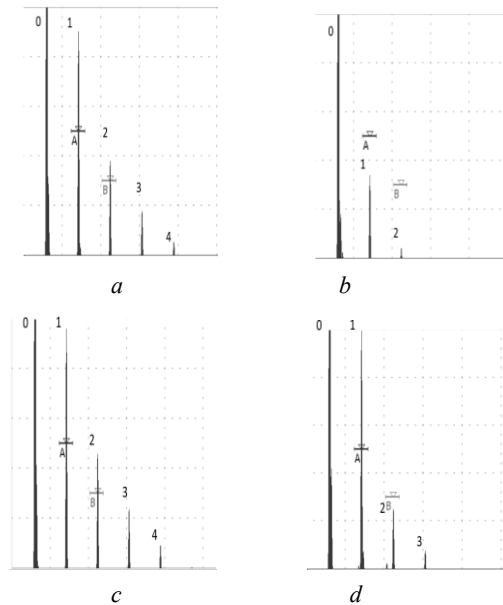


Рисунок 3 – А-сканы при исследовании эффективности выявления на стальных цилиндрах поверхностных трещин, ориентированных контроля диаметром 10 мм на частоте 5 МГц теньевым способом в отсутствие (*a*, *b*) и при наличии трещины, расположенной вдоль их оси (*c*) и перпендикулярно ей (*d*): знак 0 соответствует – импульсу опорного сигнала A_{01} , прошедшего через область контакта объект – подложка, а 1–6 – номера импульсов вращающейся моды

Литература

1. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. / под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 859 с.
2. Dymkin, G. Y. Immersion Testing of Curved Profile Objects by Surface Ultrasonic Waves / G. Y. Dymkin, A. V. Kirikov, K. A. Bondarchuk // Russian Journal of Non-destructive Testing. – 2022. – Vol. 58. – P. 679–688.
3. Баев, А. Р. Экспериментальное исследование влияния формы тела акустической нагрузки на распространение поверхностных волн / А. Р. Баев, А. В. Воробей, Н. В. Деленковский // Методология ультразвукового контроля: фундамент и современная надстройка: конф., Санкт-Петербург, 2025 г. – СПб., 2025. – С. 121–123.
4. Baev, A. R. Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control / A. R. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2025. – Vol. 16, № 2. – P. 106–120.
5. Разыграев, Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами – физические предпосылки и практическое применение / Н. П. Разыграев // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – С. 27–37.

УДК 681

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

Бакина Е. П.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Статья объясняет преимущества подхода построения прототипов до создания полноценного проекта системы контроля и управления доступом (СКУД), а также предлагает пример такого прототипа с описанием логики работы и обоснованием выбора аппаратных модулей. Разработанное устройство служит для автоматизированного ввода текстовых паролей по предъявлению RFID-карты, работоспособность проверена на учетных записях операционных систем семейства Windows. Также подчеркивается универсальность решения, в котором можно изменить как объект доступа, так и вид ключа.

Ключевые слова: СКУД, контроллер, прототип, Arduino.

MODELING ACCESS CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEM

Bakina E. P.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. This article explains the advantages of building prototypes before creating a full-fledged access control system (ACS) project, and offers an example of such a prototype, describing its operating logic and justifying the choice of hardware modules. The developed device is used for automated entry of text passwords upon presentation of an RFID card, and its functionality has been tested on Windows operating system accounts. The article also emphasizes the versatility of the solution, allowing both the access object and the key type to be changed.

Keywords: ACS, controller, prototype, Arduino.

Адрес для переписки: Бакина Е. П., Измайловский пр., 73/2, Москва 105043, Российская Федерация
e-mail: bakinaep@student.bmstu.ru

Для определения необходимости внедрения или потенциальной эффективности работы СКУД может быть полезным метод создания функциональных прототипов. Он позволяет ускорить составление технического задания, а также упрощает коммуникацию с заказчиком, наглядно демонстрируя способы реализации требований и сокращая расходы благодаря многократному использованию недорогих комплектующих.

Обоснование выбора платформы. Для вышеописанного сценария лучшим выбором является платформа Arduino. Данный подраздел посвящен обоснованию выбора.

Данная платформа была выбрана благодаря тому, что она выгодно выделяется среди других платформ своей простотой и доступностью, что делает ее идеальным выбором для начинающих разработчиков, специалистов из других сфер. В отличие от MSP430 LaunchPad и STM32, программирование Arduino не требует глубоких знаний электроники или работы с низкоуровневыми инструментами. Среда разработки Arduino IDE, бесплатно предоставляемая разработчиками платформы, интуитивно понятна и предоставляет огромный выбор библиотек, упрощая взаимодействие с периферийными устройствами, такими как RFID-считыватели или реле. Большинство модификаций Raspberry Pi Pico и ESP32 могут быть мощнее по характеристикам, но для демонстрационного прототипа СКУД эти дополнительные ресурсы, как правило, избыточны.

Помимо простоты освоения, Arduino обладает обширной экосистемой. Например, можно подключить модули Ethernet или Wi-Fi для реализации сетевых функций. В отличие от STM32 и MSP430, где требуется больше времени на настройку периферии, с Arduino это можно

сделать за кратчайшие сроки благодаря готовым решениям и активной поддержке сообщества.

Недостатки Arduino, такие как меньшая мощность процессора и память по сравнению с ESP32 [1] или Raspberry Pi Pico, часто не имеют решающего значения для демонстрационных прототипов. Для типового макета СКУД, где обработка сигналов от датчиков и управление доступом не требуют больших вычислительных ресурсов, Arduino подходит. К тому же, ее низкое энергопотребление и доступность недорогих платклонов делают ее одним из самых экономичных вариантов для создания таких устройств. В итоге, сочетание простоты, доступности и обширной базы знаний делают Arduino подходящим выбором.

Данные об устройстве. Данный раздел посвящен описанию созданного прототипа СКУД.

Устройство включает в себя два модуля: считыватель и контроллер. Требования к функционалу устройства: защита от отключения питания и вскрытия корпуса, сигнализация, отслеживание количества неудачных попыток, возможность отключения сигнализации.

В качестве считываемого признака может использоваться любой «цифровой отпечаток», будь то сканированное изображение отпечатка пальца или, например, RFID-карта (достаточно подключить к Arduino другой считывающий модуль и произвести его базовую настройку). Для рассматриваемого прототипа выбрана RFID-идентификация в силу простоты и дешевизны покупки достаточно большой тестовой выборки карточек.

В качестве объекта доступа также могут выступать различные устройства благодаря универсальности набора протоколов, которые поддерживает Arduino. В случае подключения

преграждающего устройства потребуется подключение через реле или транзистор. В рассматриваемом прототипе объектом доступа является учетная запись операционной системы Windows.

Логика работы устройства приведена на рисунке 1, используемая модель считывателя приведена на рисунке 2, используемая модель Arduino приведена на рисунке 3. Помимо данных двух модулей также используются соединительные провода, батарейки, кнопка для включения сигнализации, кнопка с рычажком (тампер) в качестве датчика вскрытия корпуса, аудиовизуальная сигнализация (динамик и сигнальная лампа).

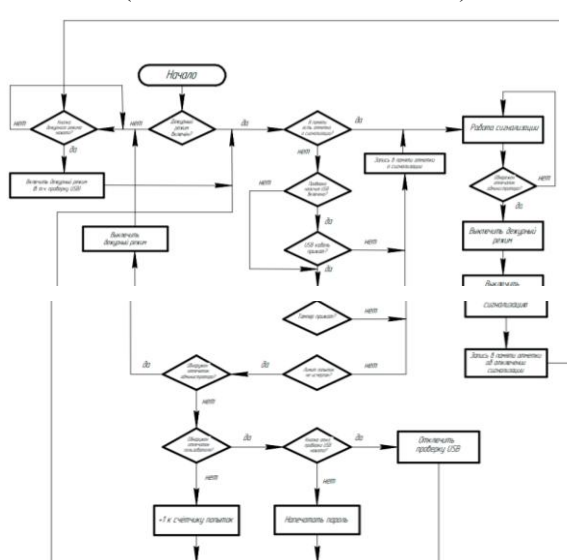


Рисунок 1 – Блок-схема поведения прототипа

Блок-схема описывает следующее поведение устройства: при включении питания производится проверка энергонезависимой памяти на предмет отметки об отключении сигнализации. Если сигнализация включена, это называется дежурным режимом. Также производится проверка отметки о срабатывании сигнализации до выключения устройства. Если сигнализация срабатывала и не была сброшена администратором, то она мгновенно включается снова. Если сигнализация не срабатывала и находится в дежурном режиме, то она срабатывает при попытке отключения шнура USB без предъявления ключа администратора (для этого применяется резервный источник питания от батареек), при попытке вскрытия корпуса.

при 5 подряд попытках предъявления неверного ключа.

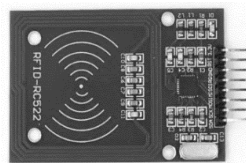


Рисунок 2 – Модуль чтения-записи RFID-RC522

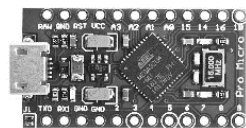


Рисунок 3 – Arduino Pro Micro

Модель Pro Micro выбрана из-за ее совместимости со стандартом HID [2], благодаря чему она может «вводить» пароль без дополнительной доработки электрической схемы и установки дополнительного ПО.

Если предъявляется ключ администратора, то система отключает сигнализацию, если она срабатывала, а также переходит в сервисный режим – появляется возможность открыть корпус или отключить питание без срабатывания сигнализации. По нажатию кнопки дежурный режим может быть включен обратно. Также предусмотрена возможность отключения устройства от USB при предъявлении ключа пользователя (для возможности выключения компьютера без срабатывания сигнализации). Основной функцией устройства является распознавание ключей пользователей и ввод соответствующих паролей от учетной записи Windows.

Благодарности. Работа выполнена под руководством доцента кафедры ИУ8 «Информационная безопасность» МГТУ им. Н. Э. Баумана, кандидата технических наук Медведева Николая Викторовича.

Литература

1. Использование современных микроконтроллеров при проектировании электронных устройств / Н. С. Яковлев [и др.] // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2024. – № 3(137). – С. 403–415.
2. Arduino Pro Micro: datasheet // SparkFun Electronics: [сайт]. – URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Boards/ProMicro16MHzv1.pdf> (date of access: 20.10.2025).

УДК 004.92, 004.925.5, 548.732

МОДЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.

НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложена модель расчета широкополосного источника рентгеновского излучения, представляющего собой источник тормозного рентгеновского излучения, состоящий из комбинации отдельных источников. Получены соотношения и разработан итерационный алгоритм, позволяющие рассчитать спектр широкополосного источника, в заданном диапазоне энергий рентгеновских фотонов. Выполнен

расчет широкополосного источника, приведен график зависимости интенсивности широкополосного источника с равномерной интенсивностью.

Ключевые слова: рентгеновское излучения, широкополосный источник, тормозной спектр рентгеновского излучения.

MODEL OF A BROADBAND X-RAY SOURCE

Balukho I. N., Dudchik Y. I., Kolchevsky N. N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU, Minsk, Belarus

Abstract. Proposed a model for calculating a broadband X-ray source, as an X-ray bremsstrahlung source consisting of a combination of separate sources. Obtained equations and developed an iterative algorithm, that allows to calculate the spectrum of a broadband source in a given range of X-ray photon energies. Calculated a broadband source and plotted a graph of the intensity of a broadband source with regular intensity.

Keywords: X-rays, broadband source, X-ray Bremsstrahlung spectrum.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7 – 403, 220045, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Формула, описывающая спектр тормозного излучения массивного анода без учета эффектов самопоглощения, записывается следующим образом:

$$I_{\lambda} = kiZ \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0 \lambda^3}, \quad (1)$$

где I_{λ} – интенсивность излучения, k – константа, i – ток рентгеновской трубки, Z – порядковый номер элемента вещества анода, λ_0 – минимальная длина волны, λ – длина волны.

Данное соотношение является основой для моделирования спектра широкополосного рентгеновского источника. Формулу (1) преобразуем в функциональную зависимость от энергии.

$$I_{\lambda}(E) = \frac{kiZ}{(hc)^3} (E_0 - E)E^2, \quad (2)$$

где E_0 – максимальная энергия рентгеновских фотонов, E – энергия фотонов.

Расчеты спектра в зависимости от энергии фотонов в диапазоне от 1 до 100 кэВ, с шагом 1 кэВ представлены на рисунке 1.

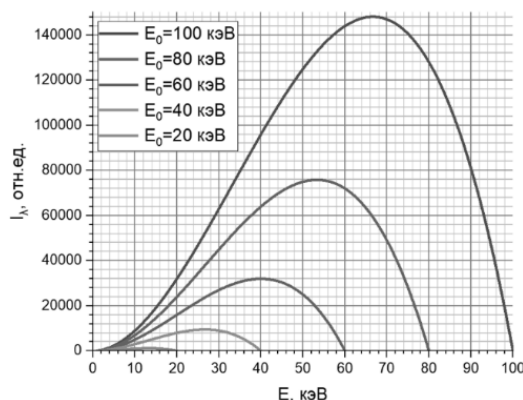


Рисунок 1 – График зависимости интенсивности от энергии фотонов

Рассмотрим задачу расчета результирующего спектра двух источников рентгеновского излучения при $E_{01} > E_{02}$. Функция интенсивности для первого источника будет выражаться следующей формулой:

$$I_{\lambda}^{(1)}(E) = \begin{cases} \frac{ki_1Z_1}{(hc)^3} (E_{01} - E)E^2, & \text{при } E \leq E_{01} \\ 0, & \text{при } E > E_{01} \end{cases} \quad (3)$$

Функция интенсивности для второго источника будет выражаться следующей формулой:

$$I_{\lambda}^{(2)}(E) = \begin{cases} \frac{ki_2Z_2}{(hc)^3} (E_{02} - E)E^2, & \text{при } E \leq E_{02} \\ 0, & \text{при } E > E_{02} \end{cases} \quad (4)$$

Результирующий спектр рентгеновского излучения двух источников, отличающихся: током рентгеновской трубки, порядковым номером элемента вещества анода, максимальными энергиями фотонов:

$$I_{\lambda}^{(12)} = \begin{cases} 0, & E > E_{01} \\ \frac{ki_1Z_1}{(hc)^3} (E_{01} - E)E^2, & E_{01} \geq E > E_{02} \\ \frac{kE^2}{(hc)^3} [i_1Z_1E_{01} + i_2Z_2E_{02} - E(i_1Z_1 + i_2Z_2)], & E \leq E_{02} \end{cases} \quad (5)$$

Расчет по данной формуле показан на рисунке 2 при энергии фотонов $E_{01} = 100$ и $E_{02} = 60$ кэВ.

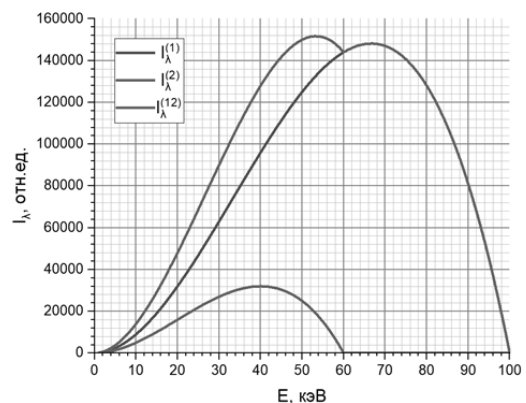


Рисунок 2 – График зависимости интенсивности от энергии фотонов результирующего спектра двух источников рентгеновского излучения

Как видно из рисунка 2 результирующая функция может состоять из трех экстремумов (двух максимумов и минимума), что позволяет создать широкополосный источник с равномерной интен-

сивностью в заданном диапазоне энергий с заданным допуском на изменение энергий, как показано на рисунке 3.

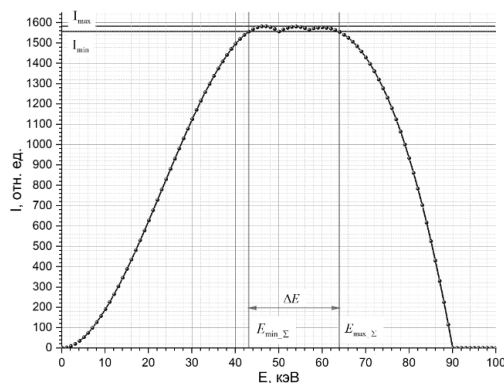


Рисунок 3 – График зависимости интенсивности широкополосного источника с равномерной интенсивностью от энергии фотонов

Отношение минимальной I_{min} интенсивности к максимальной I_{max} в заданном диапазоне спектра определяет значение допуска на изменение интенсивности в спектре $\beta = I_{min} / I_{max}$, лежащего в диапазоне (0;1). В соответствии со значением β определяется количество источников в заданном диапазоне спектра. Значение $\beta = 1$ соответствует идеальному случаю равномерной интенсивности широкополосного источника и бесконечному количеству источников.

Полученные соотношения позволяют рассчитать широкополосный источник, состоящий из N отдельных источников, с заданным значением допуска на изменение интенсивности β в заданном диапазоне энергий $E_{min\_Σ}$ и $E_{max\_Σ}$. Расчет спектра ведется от максимальной энергии к минимальной. Алгоритм расчета содержит

несколько итерационных этапов: на первом этапе определяется максимальная энергия первого источника из соотношения $E_{max\_1} = E_{01} / y_1$; на втором этапе определяется максимальное значение интенсивности первого источника из соотношения $I_{max} = (2/3) E_{01}$; на третьем этапе определяются минимальная энергия первого источника из соотношения $E_{min\_1} = E_{01} / y_2$.

Данные этапы позволяют определить ширину спектра первого источника и максимальное значение интенсивности. Затем на следующей итерации максимальная энергия второго источника рассчитывается с поправкой ξ на предыдущие итерации: $E_{max\_2} = E_{min\_1} + \xi$ и процесс расчета по этапам 1–3 повторяется. Расчет ведется до достижения необходимой энергии $E_{min\_Σ}$.

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Balukho, I. N. Broadband X-ray source / I. N. Balukho; scientific supervisor N. N. Kolchevsky // I Международный молодежный научно-культурный форум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых: сб. материалов, Гомель, 5–7 марта 2024 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 36.
2. Балухо, И. Н. Широкополосный источник рентгеновского излучения / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Современная рентгеновская оптика–2024: тр. школы молодых ученых, Нижний Новгород, сент. 2024 г. – Нижний Новгород, 2024. – С. 67.
3. Балухо, И. Н. Широкополосный источник рентгеновского излучения / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка. – 2025. – № 1. – С. 48–55.

УДК 548.73, 004.771, 621.386

ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ ПО СЕТИ ИНТЕРНЕТ К СРЕДСТВАМ УПРАВЛЕНИЯ 2-D РЕНТГЕНОВСКОЙ КАМЕРОЙ Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.

НИИ ПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Аннотация. Разработана система удаленного доступа по сети Интернет к детектору рентгеновского излучения Photonic Science. Разработанная система состоит из комбинации программ удаленного рабочего стола и разработанных кликер-программ. Программа-кликер «XRay_Click-Snap» предоставляет удаленному пользователю ограниченный доступ к функционалу рентгеновского детектора: режимам экспозиции, биннинга и предпросмотра.

Ключевые слова: детектор рентгеновского излучения, удаленный доступ, дистанционное управление, рентгеновское излучение.

X-RAY DETECTOR WITH REMOTE INTERNET ACCESS TO 2-D X-RAY CAMERA CONTROL SYSTEM Balukho I. N., Dudchik Y. I., Kolchevsky N. N.

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU, Minsk, Belarus

Abstract. Developed a system for remote internet access to the X-ray detector Photonic Science. The developed system consists of remote desktop programs and specially developed clicker programs. Clicker program “XRay_Click-Snap” provides users with limited access to X-ray detector functions: exposure modes, binning, and preview.

Keywords: X-ray detector, remote access, remote control, X-ray.

Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7 – 403, 220045, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Создание современного научно-учебного лабораторного комплекса, интегрирующего передовые методы рентгеновской диагностики, является актуальной задачей в области подготовки специалистов по технической физике, материаловедению и методам неразрушающего контроля. Разрабатываемый комплекс объединяет источник рентгеновского излучения, цифровой рентгеновский детектор с возможностью удаленного управления, компьютеризированные системы для управления положением образца и элементов рентгеновской оптики.

Комплекс будет функционировать в инфраструктуре НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (в специализированной лаборатории рентгеновской оптики) и в удаленной учебной лаборатории факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ, оснащенной компьютерными рабочими местами для выполнения лабораторных работ в режиме онлайн. Такой подход обеспечивает не только очное, но и дистанционное обучение с использованием реального научного оборудования.

В качестве детектора в составе комплекса будет использоваться уникальная рентгеновская камера Photonic Science (модель X-RAY FDI-VHR 1:2), как показано на рисунке 1. Камера состоит из блока детектирования, блока питания, водяного насоса для охлаждения блока детектирования, компьютера с платой видеозахвата и программного обеспечения для захвата и обработки изображения. Блок детектирования содержит ПЗС-матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным сцинтиллятором. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет $18 \times 12 \text{ мм}^2$, число пикселей равно 4008×2670 . Размер одного пикселя на входе камеры равен 4,5 мкм. Толщина сцинтиллятора оптимизирована для фотонов с энергией в диапазоне от 5 кэВ до 35 кэВ. Пространственное разрешение камеры зависит от размера пикселя камеры и от толщины слоя сцинтиллятора.



Рисунок 1 – Фотография рентгеновской камеры Photonic Science

В состав детектора входит управляющий компьютер под управлением Windows XP с установленным программным обеспечением (рисунок 5) для реализации функций управления режимами рентгеновской съемки, хранения и анализа экспериментальных данных. Важнейшими функциями, доступ к которым необходимо дать по сети Интернет, являются: функция предпросмотра рентгеновского изображения, функция биннинга и функции настройки экспозиции, функции передачи экспериментальных данных в учебную лабораторию с использованием технологий облачного или сетевого хранилища.

Удаленный доступ по сети Интернет к средствам управления 2-D рентгеновской камерой будет реализован в виде разработанного программного обеспечения, запускаемого на управляющем компьютере и обеспечивающего доступ к ограниченному набору функций управления детектором и реализующую процесс передачи экспериментальных изображений в облачное или сетевое хранилище. Удаленный доступ к компьютеру будет реализован с использованием типового программного обеспечения, например, AnyDesk, позволяющая реализовать следующие функции: удаленный доступ между вычислительными системами с различными операционными системами (Windows, Linux, macOS, iOS, Android), передача и менеджер файлов, автообнаружение способа подключения к интернету, обмен текстовыми сообщениями в виде чата, ведение протокола сеанса, двухфакторная аутентификация. Удаленное подключение основано на передаче данных между двумя устройствами – хостом (управляющий компьютер рентгеновского детектора, к которому подключаются студенты) и клиентом (компьютер в учебной лаборатории, с которого производится подключение и выполняются работы по управлению рентгеновским детектором). Программа, установленная на оба компьютера, позволяет клиентскому устройству отображать экран хоста и управлять им с помощью клавиатуры и мыши.

Настройка доступа на хост-компьютере будет предоставлять доступ к разработанному программному обеспечению целью которого предоставить доступ к ограниченному числу функций управляющей программы детектора, что важно для безопасности выполнения работ. Для повышения безопасности дистанционного доступа будет использоваться двухфакторную аутентификацию, которая обеспечит дополнительный уровень защиты при подключении. Все данные передаются в зашифрованном виде, что исключает утечку информации.



Рисунок 2 – Структурная схема удаленного доступа к средствам управления 2-D рентгеновской камерой

Для дистанционного управления детектором для доступа к режимам экспозиции, биннинга, предпросмотра разработана программа-кликер «XRay_Click-Snap». Программа-кликер разработана для предоставления удаленному пользователю ограниченного доступа к функционалу рентгеновского детектора. Программа кликер настраивает активную область программы детектора и последовательность нажатий (кликов). Программа-кликер «XRay_Click-Snap» разработана в среде программирования RadStudio 10.3, программа совместима со всеми версиями Windows, может быть запущена как система кликеров – при выборе разных областей нажатия и времени срабатывания. Программа содержит в

себе следующие элементы: кнопки запуска и остановки процесса, поля ввода количество кликов и время задержки в секундах, кнопку выбора области клика. Таким образом, программа позволяет автоматизировать нажатия с заданной частотой (временем срабатывания) и количеством нажатий (кликов) в рабочей программе цифрового рентгеновского детектора.

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Balukho, I. N. Broadband X-ray source / I. N. Balukho; scientific supervisor N. N. Kolchevsky // I Международный молодежный научно-культурный форум студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых: сб. материалов, Гомель, 5–7 марта 2024 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 36.
2. Балухо, И. Н. Широкополосный источник рентгеновского излучения / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Современная рентгеновская оптика–2024: тр. школы молодых ученых, Нижний Новгород, сент. 2024 г. – Нижний Новгород, 2024. – С. 67.
3. Балухо, И. Н. Широкополосный источник рентгеновского излучения / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка. – 2025. – № 1. – С. 48–55.

УДК 535.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СПЕКТР КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ

Бобученко Д. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены как начальные условия возбуждения, некоторые свойства материала струны, а также длина струны и сила натяжения струны влияют на спектр колебаний струны.

Ключевые слова: колебания струны, собственная частота колебаний, начальные и краевые условия, сила натяжения, координата точки приложения воздействия.

STUDY OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL PARAMETERS ON THE STRING VIBRATION SPECTRUM

Babuchenka D. S.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The initial excitation conditions, some properties of the string material, as well as the string length and the string tension force, are considered as influencing the spectrum of string vibrations.

Keywords: string vibrations, natural frequency of vibrations, initial and boundary conditions, tension force, coordinate of the point of application of the force.

*Адрес для переписки: Бобученко Д. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

Колебания струны являются одним из фундаментальных явлений в физике и акустике, лежащих в основе звучания многих музыкальных инструментов. Понимание того, как физические параметры струны и начальные условия возбуждения влияют на ее колебания, имеет решающее значение для глубокого анализа

тембра и воспринимаемой громкости генерируемого звука. Данная работа посвящена детальному исследованию этих зависимостей, охватывая такие факторы, как длина струны, сила натяжения, упругие свойства материала и характер возбуждения, чтобы раскрыть их комплексное влияние на спектральный состав и амплитуду

гармоник, определяющих акустические характеристики струны.

Колебания струны описываются одномерным волновым уравнением. Для однородной струны, натянутой между двумя фиксированными точками, это уравнение выглядит следующим образом [1, 2]:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2},$$

где $y(x, t)$ – смещение струны в точке x в момент времени t , v – скорость распространения волны по струне. С начальными $y(x, t=0)=f(x)$, $\frac{dy}{dt}(x, t=0)=g(x)$, и краевыми условиями $y(x=0, t)=y(x=L, t)=0$. Скорость волны v определяется как $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, где T – сила натяжения струны, μ – линейная плотность струны (масса на единицу длины, кг/м). Поскольку струна закреплена на концах, она может колебаться только на определенных дискретных частотах, называемых собственными частотами или гармониками. Эти частоты определяются длиной струны L и скоростью волны v : $v_n = n \frac{v}{2L} = n \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, где v_n – частота n -й гармоники, $n=1, 2, 3, \dots$ – номер гармоники [1, 2]. Каждая гармоника колеблется со своей амплитудой. Общее смещение струны представляет собой суперпозицию всех гармоник [1, 2]:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \sin(2\pi v_n t + \varphi_n),$$

$$\text{где } A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad tg \varphi_n = \frac{a_n}{b_n};$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx;$$

$$b_n = \frac{2}{\pi n v} \int_0^L g(x) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx.$$

Функция $y(x, t)$ описывает движение струны, которое является первопричиной для генерации звукового давления ΔP в окружающей среде, но этот процесс часто имеет промежуточные звенья (резонаторы) для эффективного преобразования механической энергии колебаний в акустическую энергию звука. В упрощенном виде, если пренебречь резонатором и рассматривать только прямую передачу от струны к воздуху (для понимания принципа), амплитуда добавочного звукового давления прямо пропорциональна амплитуде скорости колебаний струны $v_{\max}$ и акустическому импедансу среды ρc : $\Delta P_{\max, n} = v_{\max} \rho c$, где ρ – плотность среды, c – скорость звука в среде. Поскольку, максимальная скорость точки струны пропорциональна амплитуде смещения и частоте то: $\Delta P_{\max, n} = A_n 2\pi v_n \rho c$. Когда струна колеблется на нескольких гармониках, каждая из этих гармоник является потенциальным источником звуковой волны. Эти волны суммируются в воздухе, формируя сложное звуковое давление. Добавочное звуковое давление в некоторой точке пространства вблизи струны будет представлять собой сумму звуковых

давлений, создаваемых каждой гармоникой струны (без учета резонатора):

$$\Delta P(x, t) = \rho c \sum_{n=1}^{\infty} A_n v_n \cos(2\pi v_n t + \varphi_n).$$

Добавочное звуковое давление на частоте v_n зависит от свойств материала струны, длины струны L и силы натяжения T , как следует из представленных ниже выражений и параметров определяющих затухание колебаний. Самыми важными факторами являются начальные условия возбуждения, они более подробно рассмотрены в данной работе, и взаимодействие с резонатором.

Для описания начальных условий использовалась треугольная функция принадлежности, которая в общем виде задается аналитическим выражением:

$$\mu_{\Delta}(x, a, b, c) = \mu_m \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

и также интеграл:

$$\int_0^L \mu_{\Delta}(x, a, b, c) \sin kx \, dx = \frac{\mu_m}{k^2} \left\{ \frac{\sin kb - \sin ka}{b-a} - \frac{\sin kc - \sin kb}{c-b} \right\}, \quad k = \frac{\pi n}{L}$$

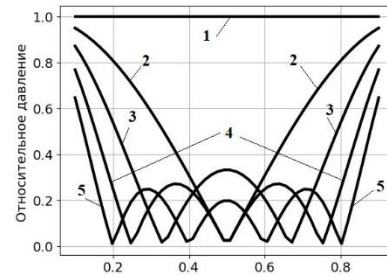


Рисунок 1 – Зависимость относительного давления от точки приложения воздействия («щипком») для различных гармоник $n = 1$ (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5)

Рассмотрим случай, когда отклонение струны в начальный момент времени в некотором месте струны произведено «щипком», то есть $g(x) = 0$, $f(x) = \mu_{\Delta}(x, 0, b, L)$, $b = mL$ – координата точки приложения воздействия, m лежит в интервале $[0, 1; 0, 9]$. При этом максимальное добавочное звуковое давление, создаваемое каждой гармоникой струны равно:

$$\Delta P_{\max, n} = \rho c \mu_m \frac{2L \sin \frac{\pi n}{L} b}{\pi n b(L-b)} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

и относительное максимальное давление равно:

$$\frac{\Delta P_{\max, n}}{\Delta P_{\max, 1}} = \frac{1 \sin \frac{\pi n}{L} b}{n \sin \frac{\pi}{L} b} = \frac{1 \sin(\pi m n)}{n \sin(\pi m)}.$$

График этой величины для различных гармоник в зависимости от места приложения воздействия представлен на рисунке 1.

Рассмотрим случай, когда отклонение струны в начальный момент времени в некотором месте струны произведено «ударом», то есть $g(x) = \mu_{\Delta}(x, a, b, c)$, $f(x) = 0$. «Удар» будем считать достаточно резким, так что $a = b - sL$; $c = b + sL$, $s < 0,5$ и также $b = mL$. При этом максимальное звуковое давление, создаваемое каждой гармоникой струны равно:

$$\Delta P_{max,n} = 2\rho c \mu_m \frac{1}{(\pi n)^2 s} (2 \sin \frac{\pi n b}{L} - \sin \frac{\pi n a}{L} - \sin \frac{\pi n c}{L}),$$

и относительное максимальное давление равно:

$$\frac{\Delta P_{max,n}}{\Delta P_{max,1}} = \frac{1}{n^2} \frac{2 \sin(\pi n m) - \sin(\pi n(m-s)) - \sin(\pi n(m+s))}{2 \sin(\pi m) - \sin(\pi(m-s)) - \sin(\pi(m+s))}.$$

График этой величины для различных гармоник в зависимости от места приложения воздействия представлен на рисунке 2, в частности видно, что не все гармоники присутствуют в колебаниях в зависимости от места приложения воздействия. Полученные формулы и приведенные рисунки позволяют

определить определенные закономерности в колебаниях струны.

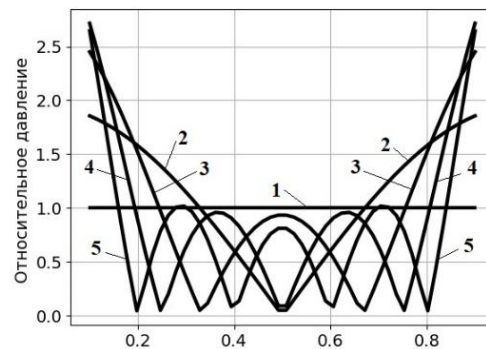


Рисунок 2 – Зависимость относительного давления от точки приложения воздействия («удар») при $s = 0,1$ для различных гармоник $n = 1$ (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5)

Литература

1. Fletcher, N. H. The Physics of Musical Instruments / N. H. Fletcher, T. D. Rossing. – New York: Springer-Verlag, 1991. – 620 p.
2. Малых, М. Д. Уравнения математической физики / М. Д. Малых. – М., 2012. – 177 с.

УДК 004.056:061.68

ВЫБОР СИГНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ С КАНАЛОМ ОПОВЕЩЕНИЯ ПО СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Бокуть Л. В.¹, Деев Н. А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены различные варианты формирования двоичных сигналов, которые позволяют обеспечить помехоустойчивость к узкополосным и импульсным помехам в системах пожарной сигнализации. Рассмотрены шумоподобные сигналы (ШПС), сигналы с параллельно-составной структурой, а также использование различных частот для входящих в группу сигналов.

Ключевые слова: помехоустойчивость, информационная последовательность абонентов, узкополосные помехи.

THE CHOICE OF SIGNALS OF INFORMATION TRANSFER IN THE FIRE ALARM SYSTEMS WITH THE CHANNEL OF THE NOTIFICATION ON THE ALTERNATING CURRENT MAIN

Bokut L. V.¹, Deev N. V.²

¹Belarusian National Technical University

²The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Belarus

Summary. In work various options of formation of binary signals which allow to provide noise stability to narrow-band and pulse hindrances in fire alarm systems are considered. Noise-type signals (SPS), signals with parallel and compound structure and also use of various frequencies for the signals entering into group are considered.

Keywords: noise stability, information sequence of subscribers, narrow-band hindrances.

Адрес для переписки: Бокуть Л. В., ул. Якуба Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lvbokut@bntu.by

В системах пожарной сигнализации линии связи должны быть защищены от воздействия пожара и сохранять работоспособность до завершения эвакуации людей. Проблема защиты от пожара линий связи решается различными способами. В работе [1] представлен анализ известных решений этой проблемы.

Как мы осуждали ранее, «активное использование низковольтных электросетей для передачи данных в системах удаленного управления и оповещения предоставляет очевидную альтернативу различным проводным и беспроводным линиям связи» [2].

Проведем исследование передачи данных по силовым линиям (PLC) и использования каналов передачи информации по низковольтным сетям переменного тока в системах пожарной сигнализации. Высокий уровень помех в низковольтной промышленной сети переменного тока существенно ограничивает их применение в качестве трансляционных систем и требует разработки устройств с повышенной помехозащищенностью и надежностью [3].

Помехи в канале оповещения по сети переменного тока носят, как известно, импульсно-непрерывный характер. Статистическое описание таких помех отличается от гауссовских помех. В связи с этим наиболее помехоустойчивыми системами передачи информации по указанным каналам следует считать системы с широкополосными шумоподобными сигналами (ШПС) и сигналами с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

За счет частотно-временной избыточности ШПС обеспечивают требуемую помехоустойчивость по отношению к узкополосным и импульсным помехам.

Основные характеристики шумоподобных сигналов определяются в первую очередь требуемой скоростью передачи информации, количеством абонентов, пропускной способностью каналов связи [3].

Примем для определенности диапазон частот канала в пределах 100÷150 кГц, количество информационных источников (абонентов) – 250, полосу спектра передаваемого сигнала $\Delta F = 10$ кГц. При временном уплотнении сигналов абонентов и последовательном опросе абонентов скорость передачи информации C_i каждого абонента определяется вышеуказанными условиями и равна $C_i = 250/c$, $i = \overline{1, 250}$. Отсюда следует, что скорость обновления информации, поступающей от абонента, равна $1/c$. При этом база B_a сигнала каждого абонента определяется соотношением $B_a = \Delta F / C_i = 40$, $i = \overline{1, 250}$. Параметр B_a шумоподобного сигнала обеспечивает запас помехоустойчивости системы передачи пожарной сигнализации.

Итак, за счет использования ШПС обеспечивается эффективный прием сигналов на фоне помех.

Рассмотрим возможные варианты формирования информационной последовательности абонентов. Абонентская последовательность в простейшем случае определяется его двоичным номером. При количестве абонентов $N = 250$ число двоичных разрядов определяется величиной $n = \log_2 N = 8$. При базе $B_a = 40$ эффективная база сигнала, приведенная к одиночному разряду двоичного числа, равна $B_{эфф} = B_a / n = 5$.

Для того чтобы сохранить помехоустойчивость системы передачи информации, заложенной в базе B_a сигнала, различие абонентов

можно осуществить на основе различия N ортогональных сигналов, формируемых, например, с помощью функций Уолша W_i , $i = \overline{1, 250}$.

Вероятность искаженного приема пакета длительностью N бит на i -том частотном канале p^i при наличии гармонической помехи на частоте f_{Π} зависит от отстройки частоты f_{Π} от центральной частоты рабочего канала f_i и при гипотезе о независимости распределения шума на соседних символических интервалах равна [4]:

$$P^i = 1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N, i \in [0, M - 1],$$

где $\gamma_i = 4T(f_{\Pi} - f_i)$ – отстройка помехи от центральной частоты i -того частотного канала, нормированная к девиации частоты при ММС, $\mu = A_{\Pi}/A_c$ – отношение амплитуды помехи к амплитуде полезного сигнала.

Пакет будет принят неправильно при приеме с ППРЧ при появлении каких-то ошибок на каждом из M частотных каналов. Тогда вероятность искаженного приема пакета длительностью N бит равна

$$P = \prod_{i=0}^{M-1} P^i = \prod_{i=0}^{M-1} \left[1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N\right]. \quad (1)$$

Средняя вероятность битовой ошибки при приеме пакета сообщений равна:

$$p = 1 - (1 - P)^{1/N}. \quad (2)$$

Далее получим, подставив (1) в (2):

$$p = 1 - \left(1 - \prod_{i=0}^{M-1} P^i\right)^{1/N} = 1 - \left(1 - \prod_{i=0}^{M-1} \left[1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N\right]\right)^{1/N}. \quad (3)$$

Наконец, получим полное выражение для средней вероятности неверного приема при M канальном ППРЧ, подставив в (3) выражение для вероятности битовой ошибки приема на i -том частотном канале.

Третий вариант формирования сигнала связан с расширением частотного ресурса за счет использования различных частот для входящих в группу сигналов. Использование разных частот делает систему устойчивой к узкополосным помехам. Узкополосная помеха воздействует на один или несколько сигналов, работающих на своих частотах, а не на всю систему.

Частотное уплотнение требует увеличения полосы канала в k раз, что усложняет систему передачи и приема информации. Для разделения сигналов необходимо наличие на приемной стороне полосовых фильтров, это усложняет аппаратуру.

Литература

1. Модульный принцип построения пожарной сигнализации для жилых помещений / И. Е. Зуйков, А. Г. Василевский, А. А. Антошин, Д. Л. Есипович //

Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2009 г.: в 3 т. – Мн., 2009. – Т. 1. – С. 314–317.

2. Антошин, А. А. Передача информации между удаленными компонентами системы пожарной сигнализации / А. А. Антошин, Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Безопасность человека и общества: совершенствование системы реагирования и управления защитой от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. – Мн: УГЗ, 2018. – С. 11–16.

3. Антошин, А. А. Система пожарной сигнализации с передачей данных по низковольтной сети переменного тока / А. А. Антошин, Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2(32). – С. 88–99.

4. Присяжнюк, И. В. Повышение помехоустойчивости приема сообщений в охранных радиотехнических системах при наличии замираний и внешних помех: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / И. В. Присяжнюк. – СПб., 2005. – 134 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003299820> (дата обращения: 19.09.2025).

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННОГО КРЕМНИЕВОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

Борздов А. В., Борздов В. М., Буйновский Д. Н.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. С помощью многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование тока в кремниевом лавинном фотодиоде со структурой $p^+-i-p-n^+$, работающем в режиме обратного смещения при воздействии пикосекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 650 нм. Рассмотрены диодные структуры с различной толщиной и различными уровнями легирования рабочих областей.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, кремний, метод Монте-Карло.

SIMULATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A SUBMICRON SILICON AVALANCHE PHOTODIODE

Borzdov A. V., Borzdov V. M., Buinouski D. N.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. Using the ensemble Monte Carlo method, we simulated the current in a silicon avalanche photodiode with a $p^+-i-p-n^+$ structure operating in reverse-bias mode under the influence of picosecond pulses of laser radiation with a wavelength of 650 nm. Diode structures with different thicknesses and doping levels of the device's operating regions were considered.

Keywords: avalanche photodiode, silicon, Monte Carlo method.

*Адрес для переписки: Борздов А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: BorzdovAV@bsu.by*

Полупроводниковые фотодиодные структуры находят широкое применение в оптоэлектронике как преобразователи оптического излучения в электрические сигналы. Полупроводниковые фотодиоды, в частности кремниевые, являются основными элементами для создания детекторов излучения видимого и инфракрасного спектрального диапазона. Работать такие фотодиоды могут как в обычном токовом режиме, так и в режиме счета отдельных единичных фотонов [1, 2].

Численное моделирование электрических характеристик фотодиодов является важной задачей в рамках разработки и проектирования таких элементов с целью прогнозирования их рабочих характеристик. Для моделирования электрических характеристик интегральных субмикронных фотодиодов и фототранзисторов одним из наиболее перспективных методов является самосогласованное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло [3–6]. Многочастичный метод Монте-Карло, как метод кинетического моделирования, позволяет проводить имитацию процессов переноса носителей заряда в приборных полупроводниковых структурах. При этом существует возможность учета при

моделировании основных, наиболее значимых, процессов рассеяния носителей заряда, а также процессов их генерации-рекомбинации. В случае лавинных фотодиодов (ЛФД) со структурой $p^+-i-p-n^+$, работающих в режиме обратного смещения, особенно важным является учет процессов лавинного умножения носителей заряда вследствие процессов межзонной ударной ионизации.

Схематически структура моделируемого ЛФД представлена на рисунке 1. Излучение направлено нормально к поверхности и охватывает область между электродами длиной $LC = 0,5$ мкм. Толщина i -слоя равна $W_i = 0,4$ мкм, а толщины легированных слоев полагаются одинаковыми ($W_{d1} = W_{d2} = W_{d3}$) и равными либо 0,1 мкм, либо 0,2 мкм. Концентрации донорной и акцепторной примесей в n^+ - и p^+ -областях при расчетах полагаются равными 10^{24} м^{-3} , а уровень легирования p -области варьируется от 10^{21} до 10^{23} м^{-3} .

Расчет фототока в рассмотренных ЛФД проводится в рамках самосогласованного двумерного моделирования методом частиц [3, 7]. Интенсивность излучения составляет 1011 Вт/м^2 , длительность импульса – 1 пс. Излучение включается в момент времени $t = 0$ пс. Температура

Proceedings of SPIE. – 2022. – Vol. 12157. – Art. 121570Y.

7. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.

8. Borzdov, A. V. Monte Carlo simulation of photoreponse in silicon photodiodes with p-n-junction and p-i-n-

structure / A. V. Borzdov [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2025. – Vol. 16, № 2. – P. 140–146.

9. Wang, H. Absorption coefficients of crystalline silicon at wavelengths from 500 nm to 1000 nm / H. Wang, X. Liu, Z. M. Zhang // International Journal of Thermophysics. – 2013. – Vol. 34. – P. 213–225.

УДК 620.178.152.28

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Доронин К. И.¹, Уманский А. С.¹, Гоголинский К. В.^{2,3}

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

²Санкт-Петербургский государственный университет,

Санкт-Петербург, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,

Гатчина, Россия

Аннотация. Работа посвящена применению метода инструментального индентирования для оценки наличия напряженно-деформированного состояния в материале. При проведении измерений механических свойств образца стали марки Ст3 выявлено изменение значений твердости и модуля упругости при изменении напряженно-деформированного состояния. Определено, что значение модуля упругости, измеренное на упруго деформированном образце, превышает измеренное в ненагруженном состоянии значение более чем на 30 %, что позволяет использовать его для диагностирования остаточных напряжений.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, напряженно-деформированное состояние, модуль упругости.

INFLUENCE STUDY OF THE MECHANICAL STRESSES ON THE MEASUREMENT OF MECHANICAL PROPERTIES BY THE INSTRUMENTED INDENTATION TEST

Doronin K. I.¹, Umanskii A. S.¹, Gogolinskii K. V.^{2,3}

¹Saint Petersburg Mining University

²St. Petersburg State University

St. Petersburg, Russia

³NRC "Kurchatov Institute" - PINP

Gatchina, Russia

Abstract. Paper examines the use of instrumented indentation to assess the presence of stress-strain in a material. Mechanical properties of a St3 steel sample were measured, revealing changes in hardness and elastic modulus with changes in the stress-strain state. It was determined that the elastic modulus measured on an elastically deformed sample exceeds measured in an unloaded state by more than 30 %, allowing it to be used to diagnose residual stresses.

Keywords: instrumented indentation, stress-strain state, young's modulus.

Адрес для переписки: Доронин К. И., 21-я линия В. О., 2, г. Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: doronin.k.i@mail.ru

Введение. Использование методов индентирования широко распространено при изучении локальных механических свойств на масштабах от миллиметров классическими методами до микро- и наномасштабов методом инструментального индентирования. Возможности современных приборов позволяют использовать их не только для исследования образцов материалов, но и для диагностирования технического состояния различных объектов. Перспективным направлением использования метода инструментального индентирования (ИИ) является определение параметров напряженно-деформированного состояния в материале. Например, с помощью известных методов возможно определение остаточных напряжений в поверхностных слоях и покрытиях [1, 2]. В данной работе проведено исследование влияния механических напряжений

в образце на результат измерения твердости и модуля упругости материала методом ИИ.

Методы. Для эксперимента использовался образец в виде пластины с пропилом из стали марки Ст3. Упругая деформация на образце задавалась с помощью неконтролируемого зажима тисков в зоне над пропилом. Таким образом создавалось поле напряжений, результат конечно-элементного моделирования которого представлен на рисунке 1.

Для измерения модуля упругости E_{IT} и твердости H_{IT} методом ИИ применялся модуль механических испытаний сканирующего нанотвердомера «Наноскан-4D+» (ТИСНУМ, Россия). Область измерения указана на рисунке 1. Измерения и расчет модуля упругости проводились в соответствии с [3]. Максимальная нагрузка на индентор (пирамида Берковича) при испытаниях составила $P_{max} = 100$ мН. Проводились три серии

по 16 измерений: до нагружения, на деформированном образце и после снятия нагрузки.

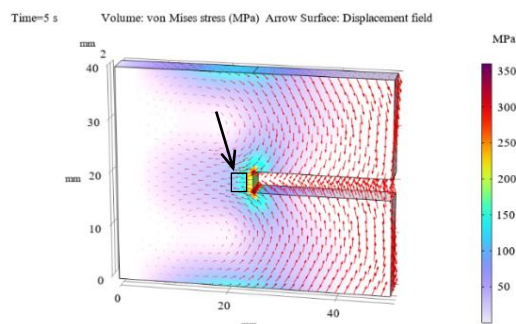


Рисунок 1 – Поле распределения напряжений при нагрузке на образец

Результаты. Численные результаты испытаний представлены в Таблице 1. В качестве показателя разброса использовано значение СКО.

Таблица 1 – Результаты испытаний методом ИИ

Этап	H_{IT} , ГПа	E_{IT} , ГПа
1. До нагружения	$1,54 \pm 0,23$	187 ± 2
2. Нагружение	$1,99 \pm 0,21$	249 ± 3
3. Разгрузка	$1,59 \pm 0,24$	181 ± 7

Построенные в процессе испытаний диаграммы индентирования представлены на рисунках 2 и 3. Совпадение результатов измерений до нагружения и после разгрузки подтверждает упругий характер деформации, поскольку при достижении предела текучести и протекания пластической деформации характерно увеличение твердости металла [4].

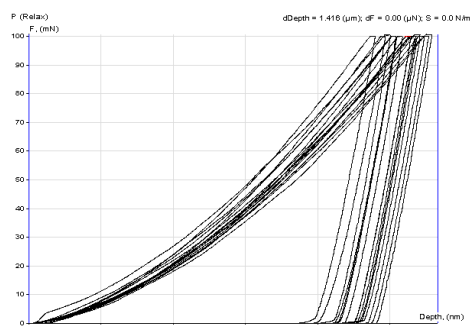


Рисунок 2 – Диаграммы индентирования при нагружении образца

Полученный диапазон значений модуля упругости при отсутствии деформации/напряжений на образце $E_{IT} = 180 \div 190$ ГПа весьма близок к справочному значению для стали Ст3 (196 ГПа). При нагружении значение модуля увеличилось на 30 % и составило $E_{IT} \approx 250$ ГПа. Данное значение является аномальным для большинства видов сталей, что может считаться надежным индикатором

наличия механических напряжений. Измеренные значения твердости меняются в таких же пропорциях, однако их диапазон не выходит за пределы, характерные для данной марки стали при различных режимах ее обработки, поэтому твердость не может служить надежным диагностическим параметром напряженного состояния.

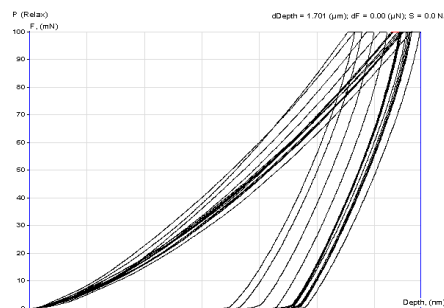


Рисунок 3 – Диаграммы индентирования без нагрузки на образец

Выводы. При измерении модуля упругости стали методом инструментального индентирования на упруго деформированном образце выявлено его значительное (до 30 %) увеличение относительно измерений в ненагруженном состоянии и справочного значения модуля упругости. Для установления количественной зависимости изменения модуля упругости от упругих напряжений требуется обеспечить контроль усилия тисков в процессе эксперимента. Значительный интерес также представляет использование метода динамического инструментального индентирования для оценки параметров напряженно-деформированного состояния [2,4], поскольку данный метод реализуется с помощью портативных твердомеров и может применяться в полевых условиях.

Литература

1. Takakuwa, O. Estimation of the Yield Stress of Stainless Steel from the Vickers Hardness Taking Account of the Residual Stress / O. Takakuwa, Y. Kawaragi, H. Soyama // Journal of Surface Engineering Materials and Advanced Technology. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 262–268.
2. Kren, A. P. Determination of the residual stresses by the dynamic indentation method / A. P. Kren, V. V. Rudnitsky, A. Udot // 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague. – 2014.
3. ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. – Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с.
4. Possibility Evaluation of Monitoring Areas of Local Plastic Deformation During Fatigue Wear of Metal Structures Using the Dynamic Instrumented Indentation Method / D. S. Gromyka [et al.] // International Journal of Engineering. – 2026. – Vol. 39. – P. 104–111.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО РАСТЕКАНИЯ ЛИНИЙ ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О. Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Методом Монте-Карло проведено моделирование процесса паразитного туннелирования электронов в элементах флеш-памяти на основе МОП-транзисторов с плавающим затвором. Рассчитаны зависимости величины паразитного туннельного тока от координаты вдоль проводящего канала транзисторов с мелким и глубоким стоком. Показано, что в транзисторах с глубоким стоком происходит подавление паразитного туннелирования за счет процесса растекания линий тока в глубь подложки.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, паразитный туннельный ток, метод Монте-Карло.

MONTE CARLO SIMULATION OF CURRENT LINES SPREADING IN FLASH MEMORY CELLS

Zhevnyak O. G.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The parasitic electron tunneling in silicon flash memory elements based on MOSFETs with floating gates is simulated by Monte Carlo method. The dependencies of value of parasitic tunnel current along the transistor's channel with shallow and deep drains are calculated. It is shown that in transistors with deep drain the parasitic electron tunneling is suppressed by effect of drift current lines spreading into substrate.

Keywords: flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, parasitic tunnel current, Monte Carlo simulation.

Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, г. Минск 220036, Республика Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

Введение. Подавление паразитного туннелирования в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом флеш-памяти, обеспечивается при условии отсутствия в этих транзисторах большого количества разогретых электронов, способных проникнуть на плавающий затвор [1, 2]. Фактически, это равнозначно условию недопущения формирования вблизи туннельного оксида токов проводимости j_{dr} высокой плотности, так как $j_{dr} \approx N_{el} v_{dr}$, где N_{el} – концентрация электронов, а v_{dr} – их дрейфовая скорость, величина которой прямо пропорциональна значению энергии. При этом последний параметр более важный, так как высокая энергия электронов существенно усиливает темп паразитного туннелирования. Целью настоящей работы было проанализировать влияние глубины залегания стока в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором на линии тока в них и на эффект подавления паразитного туннелирования путем моделирования электронного переноса методом Монте-Карло в этих транзисторах.

Используемая модель. В настоящей работе нами исследовался короткоканальный n -МОП-транзистор с плавающим затвором, образующий элемент флеш-памяти, со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,15$ мкм, толщина подзатворного оксида кремния $d_{окс} = 7$ нм, толщина туннельного оксида кремния $d_{тун} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{плав} = 2$ нм, глубины залегания истоковой и стоковой областей в подложку d_j составляли 10 нм, 50 нм и 100 нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$,

концентрация акцепторной примеси в канале $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, напряжения на стоке и затворе $V_D = 2 \text{ В}$, $V_G = 2 \text{ В}$.

Алгоритм и процедуры моделирования электронного переноса в короткоканальном МОП-транзисторе, а также процедура самосогласованного решения уравнения Пуассона для расчета распределения электрических полей по структуре приведены в нашей работе с соавторами [3]. Процедуры моделирования процесса паразитного туннелирования электронов из проводящего канала МОП-транзистора на плавающий затвор электронов описаны в наших работах [2, 4].

Результаты моделирования и их обсуждение. На рисунке 1–3 приведены зависимости плотностей туннельного и дрейфового токов у поверхности раздела Si/SiO₂ (рисунки 1–2) и дрейфового тока в глубине подложки (рисунок 3) вдоль проводящего канала транзистора от глубины залегания истоковой и стоковой областей в исследуемом МОП-транзисторе, полученные нами в результате проведения численного моделирования электронного переноса в рассматриваемом элементе флеш-памяти методом Монте-Карло. На всех рисунках непрерывные кривые соответствуют транзистору с $d_j = 10$ нм, штриховые – $d_j = 50$ нм и пунктирные – $d_j = 100$ нм.

Из рисунка 1 следует, что зависимость величины плотности паразитного туннельного тока вдоль проводящего канала от истока ($x/L_{ch} = 0$) к стоку ($x/L_{ch} = 1$) для транзисторов с глубоким стоком (с $d_j = 50$ нм и 100 нм) меняет свое поведение в сравнении с транзисторами с мелким стоком ($d_j = 10$ нм). При этом данная величина вблизи стока там, где наблюдается наиболее существенный разогрев

электронов, заметно уменьшается — для транзисторов с $d_j = 5$ нм почти в четыре раза, а с $d_j = 100$ нм почти в десять раз в сравнении с транзистором с $d_j = 10$ нм.

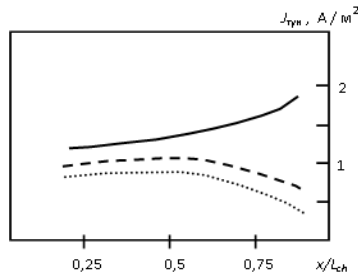


Рисунок 1 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности паразитного туннельного тока на плавающий затвор

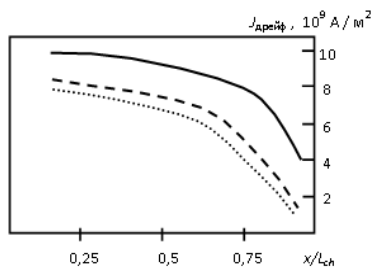


Рисунок 2 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности дрейфового тока, текущего от истока к стоку в канале транзистора у поверхности раздела Si/SiO₂

Понять такое качественное изменение характера этой зависимости позволяет рисунок 2. Как можно видеть, вблизи стока происходит заметное уменьшение плотности текущего в канале у поверхности раздела Si/SiO₂ дрейфового тока. При этом у транзисторов с глубокими истоком и стоком такое уменьшение выражено куда сильнее (в 7–8 раз), нежели с мелкими (чуть более чем в 2 раза). И хотя энергия электронов у стока повышается, у транзисторов с глубокими стоками она не может компенсировать существенное уменьшение плотности дрейфового стока у туннельного оксида, что и приводит к уменьшению величины паразитного туннельного тока.

Как показывает рисунок 3, такое уменьшение плотности дрейфового тока у поверхности обусловлено более сильным растеканием линий тока

в глубь подложки для транзисторов с глубоким истоком и стоком и повышением плотности дрейфового тока в сечениях канала, удаленных от поверхности Si/SiO₂.

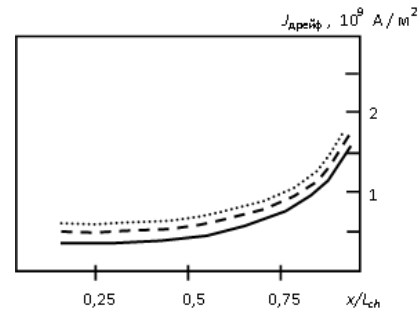


Рисунок 3 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности дрейфового тока в сечении канала в глубь подложки в 50 нм от поверхности раздела Si/SiO₂

Закключение. Таким образом, с помощью кинетического моделирования электронного переноса методом Монте-Карло были рассчитаны зависимости вдоль канала величины плотности паразитного туннельного тока. Показано, что в транзисторах с глубокими истоками и стоками наблюдается заметное уменьшение величины этой плотности, что свидетельствует о подавлении в них паразитного туннелирования за счет растекания линий тока в глубь подложки.

Литература

11. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: Paths of Innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE, 2009. – 256 p.
2. Жевняк, О. Г. Моделирование пространственных характеристик электронного переноса в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, Я. О. Жевняк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – Вып. 10, Ч. 1. – С. 6–9.
3. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование влияния глубины залегания стока на паразитные туннельные токи в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В. Борздов // Евразийский Союз Ученых. Серия: Технические и физико-математические науки. – 2021. – Т. 1, № 12. – С. 58–61.

УДК 681

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАЦИОНАРНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО НА ЯЗЫКЕ PYTHON

Забогонский К. А., Шадурская Л. И., Воробей Р. И., Гусев О. К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлено моделирование процессов стационарной рекомбинации с использованием специализированного программного обеспечения, реализованного на языке Python. Разработанный программный комплекс позволяет учитывать влияние дефектов и примесей в полупроводниках и получать зависимости функций заполнения и времени жизни носителей от концентрации избыточных зарядов.

Ключевые слова: полупроводники, рекомбинация, моделирование, Python, программное обеспечение.

MODELING OF STATIONARY RECOMBINATION PROCESSES USING SPECIALIZED SOFTWARE IMPLEMENTED IN PYTHON

Zabogonsky K.A., Shadurskaya L.I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents modeling of stationary recombination processes using specialized software implemented in Python. The developed software allows considering the influence of defects and impurities in semiconductors and provides dependencies of filling functions and carrier lifetime on excess charge concentration.

Keywords: semiconductors, recombination, modeling, Python, software.

Адрес для переписки: Забогонский К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь e-mail: kzabogonski@gmail.com

Развитие современной микроэлектроники неразрывно связано с улучшением характеристик полупроводниковых приборов. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность работы таких устройств, является рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ). Время жизни электронов (τ_n) и дырок (τ_p) определяется сложным комплексом процессов, зависящих от температуры, уровня инжекции, а также от параметров дефектов и примесей, присутствующих в полупроводниках. Корректный расчет τ_n и τ_p представляет сложную задачу при наличии нескольких типов дефектов и примесей, взаимодействующих между собой.

Численные методы позволяют учитывать взаимодействие различных центров в условиях произвольного уровня инжекции [1]. Расчет требует решения системы нелинейных уравнений, в которых переменными являются неравновесные стационарные функции заполнения дефектов f_i , а сами уровни описывают баланс между процессами захвата и эмиссии. Обычно такие системы решаются с помощью итерационных численных методов, например, метода Ньютона или его модификаций, реализованных в библиотеке `scipy.optimize`. Специализированное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс вычислений, снизить вероятность ошибок и ускорить получение результатов. В качестве инструмента для реализации был выбран язык Python, обладающий широким набором библиотек для научных расчетов, удобством синтаксиса и высокой популярностью в инженерных задачах. На рисунке 1 приведена блок-схема алгоритма решения системы нелинейных уравнений, описывающих рекомбинационные процессы в полупроводниках с несколькими видами примесей и дефектами в широком диапазоне уровней инжекции.

Вторая часть программного комплекса была направлена на расширение модели с учетом трех рекомбинационных уравнений. Для этого система уравнений была дополнена функцией f_3 , вычисляющей перезарядку третьего уровня в зависимости от уровня инжекции. Решение выполнялось численно при помощи метода `fsolve` из пакета `scipy.optimize`. Для удобства анализа исходных данных и результатов вычислений использовались табличные формы с применением библиотеки `PrettyTable`.

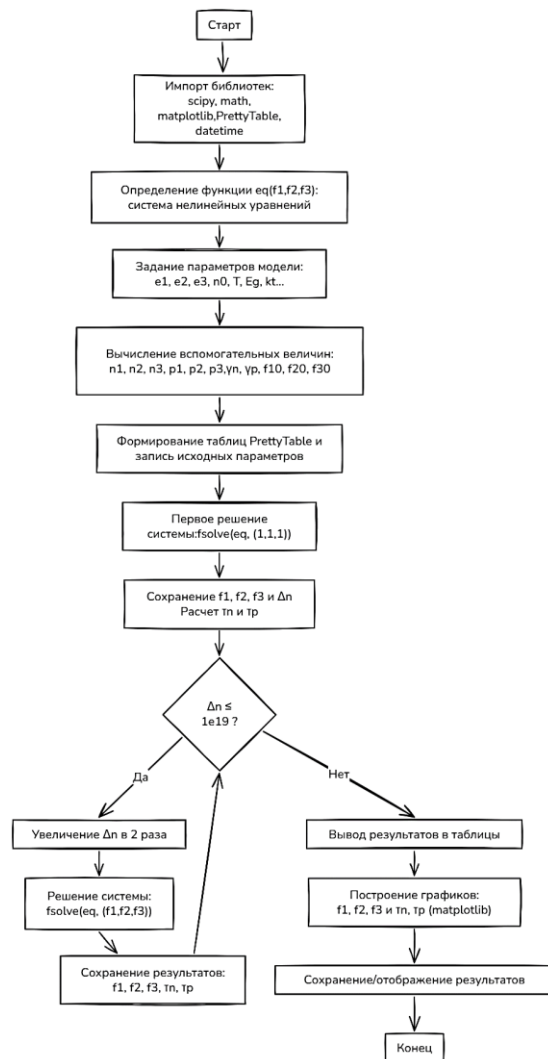


Рисунок 1

В результате проведенного моделирования получены зависимости неравновесных стационарных функций распределения f_1 , f_2 , f_3 , а также времени жизни электронов и дырок τ_n и τ_p от концентрации избыточных носителей заряда в случае трех типов глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника (рисунки 1 и 2).

$$\Delta n = 1 \cdot 10^8, T = 100\text{K}, E_g = 0.745 \text{ эВ},$$

$$e_1 = 0.20 \text{ эВ}, e_2 = 0.15 \text{ эВ}, N = 7 \cdot 10^{14},$$

$$n_0 = 3 \cdot 10^{13}, \gamma_{n1} = 2.0 \cdot 10^{-12},$$

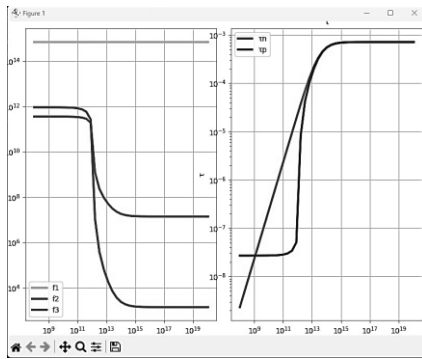


Рисунок 2

$$\gamma n_2 = 1.0 \cdot 10^{-10}, \gamma p_1 = 1.0 \cdot 10^{-4},$$

$$\gamma p_2 = 1.0 \cdot 10^{-6}, k$$

УДК 681

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ

Забогонский К. А., Шадурская Л. И., Свистун А. И., Самарина А. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается разработка программного обеспечения для расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с глубокими центрами. Использован язык Python и специализированные библиотеки для численного решения уравнений и визуализации результатов. Программное обеспечение автоматизирует вычисления и позволяет эффективно интерпретировать данные.

Ключевые слова: полупроводники, время жизни, Python, моделирование, программное обеспечение.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR CALCULATING THE LIFETIME OF NON-EQUILIBRIUM CHARGE CARRIERS IN SEMICONDUCTORS WITH DEEP CENTERS

Zabogonsky K. A., Shadurskaya L. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the development of software for calculating the lifetime of non-equilibrium charge carriers in semiconductors with deep centers. Python and specialized libraries for numerical solutions and visualization were used. The software automates calculations and provides effective data interpretation.

Keywords: semiconductors, lifetime, Python, modeling, software.

Адрес для переписки: Забогонский К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: k zabogonski@gmail.com

В работе рассматривается разработка программного обеспечения для расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с глубокими центрами. Для реализации использован язык программирования Python и специализированные библиотеки для численного решения уравнений и визуализации результатов. Приводится структура программы, примеры кода и графическая интерпретация полученных данных.

Современные технологии в области приборостроения и микроэлектроники требуют высокой точности при расчетах характеристик полупроводниковых материалов. Одним из ключевых параметров является время жизни неосновных носителей заряда, от которого зависят электрические свойства материала и эффективность работы приборов [1].

$$T = 8.617 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

Предложенная программа и моделирование рекомбинационных процессов с ее использованием позволяет сформировать целостную картину процессов в полупроводниковом материале с произвольным количеством дефектов разной природы в широком диапазоне уровней инжекции.

Литература

1. Забогонский, К. А. Итерационный метод расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках / К. А. Забогонский, И. А. Париза, Л. И. Шадурская // Новые направления развития приборостроения: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 17–19 апр. 2024 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 32–33.

Разработка специализированного программного обеспечения позволяет автоматизировать процесс вычислений, снизить вероятность ошибок и ускорить получение результатов. В качестве инструмента для реализации был выбран язык Python, обладающий широким набором библиотек для научных расчетов, удобством синтаксиса и высокой популярностью в инженерных задачах.

При моделировании учитывались уравнения, описывающие рекомбинационные процесс стационарной рекомбинации в полупроводниках содержащие примеси и дефекты с глубокими уровнями. Основной задачей было решение системы нелинейных уравнений относительно функций f_i ($i = 1, 2 \dots$), описывающих инжекционную перезарядку дефектов.

Для решения применялся численный метод с использованием функции `fsolve` из библиотеки

scipy.optimize [3]. В качестве дополнительных средств были использованы:

math – стандартная библиотека Python для выполнения математических операций;

matplotlib – модуль для построения графиков, применялся для визуализации зависимостей;

prettytable – для вывода промежуточных и итоговых результатов в табличном виде.

Программное обеспечение было разделено на два основных блока:

1. Решение уравнения – поиск значений $f1$ и $f2$ методом приближений;

Пример реализации цикла:

```
while delta_n <= 1e18:
    delta_n *= 2
    f1, f2 = fsolve(eq, (priblizh_f1, priblizh_f2))
    arr_delta_n.append(delta_n)
    arr_f1.append(f1)
    arr_f2.append(f2)

    delta_p = delta_n + big_n1*(f1 - f10) +
    big_n2*(f2 - f20)

    tau_n.append(delta_n / (big_n1*gama_n1*((1 -
    f1)*(n0 + delta_n) - n1*f1) +
    big_n2*gama_n2*((1 - f2)*(n0 + delta_n) -
    n2*f2)))

    tau_p.append(delta_p / (big_n1*gama_p1*((p0
    + delta_p)*f1 - (1 - f1)*p1) +
    big_n2*gama_p2*((p0 + delta_p)*f2 - (1 -
    f2)*p2))).
```

2. Циклический пересчет – увеличение параметра Δn в логарифмическом масштабе и расчет соответствующих значений времени жизни τn и τp .

На рисунке 1 представлены зависимости функций распределения $f1$, $f2$, а также времени жизни электронов и дырок в зависимости от уровня инжекции.

$$e1 = 0,20 \text{ эВ}, e2 = 0,45 \text{ эВ}, \Delta n = 1 \cdot 10^8, \\ n_0 = 1 \cdot 10^{14}, T = 100 \text{ К.}$$

Пример реализации цикла: `def eq(p):`

```
f1, f2 = p
return (
    big_n1*gama_n1*((1 - f1)*(n0 + delta_n) -
    n1*f1) -
    big_n1*gama_p1*((p0 + (delta_n + big_n1*(f1
    - f10) + big_n2*(f2 - f20))*f1 - (1 - f1)*p1),
```

$$big\_n2*gama\_n2*((1 - f2)*(n0 + delta\_n) - \\ n2*f2) - \\ big\_n2*gama\_p2*((p0 + (delta\_n + big\_n1*(f1 \\ - f10) + big\_n2*(f2 - f20))*f2 - (1 - f2)*p2)).$$

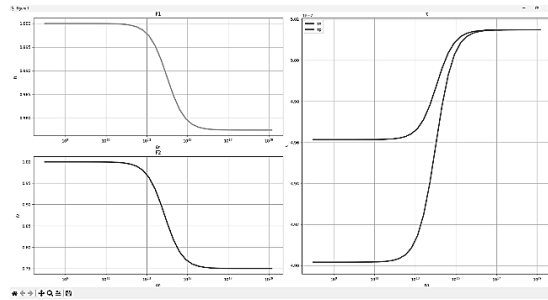


Рисунок 1

Для наглядного представления зависимостей были построены графики функций $f1$, $f2$, а также времен жизни носителей τn и τp в зависимости от концентрации Δn .

Пример визуализации:

```
plt.figure(figsize = (8,6))
plt.subplot(2,2,1)
plt.plot(arr_delta_n, arr_f1, linewidth = 3,
color = 'orange')
plt.grid()
plt.title('F1')
plt.xlabel('Delta n')
plt.ylabel('f1')
plt.semilogx().
```

Разработанное программное обеспечение позволяет эффективно рассчитывать время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с глубоким уровнем в широком диапазоне уровней инжекции k и визуализировать результаты в удобной форме. Благодаря применению Python и его библиотек удалось реализовать комплексное решение, включающее как численные методы, так и графическую интерпретацию данных.

Программный подход, может быть, адаптирован для других задач физики полупроводников и применен в инженерных расчетах при проектировании электронных приборов.

Литература

1. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

УДК 528.714;528.854.4;551.593.5

**МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ
ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДУЛЕЙ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ
НА ОСНОВЕ СНИМКОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Защепко П. А.^{1,2}, Зайцева В. А.¹, Данильченко А. Ю.¹, Федорцев Р. В.²

¹ОАО «Пеленг»,

²Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Аннотация. В программное обеспечение (ПО) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по обработке целевой информации (ЦИ) входят множество важных модулей и подпрограмм, одним из которых является модуль атмосферной коррекции (АК). В данной статье представлен способ формирования тестовых данных для модулей АК на основе снимков, полученных с функционирующих на орбите КА. В будущих работах предлагается использование данного метода формирования тестовых данных при комплексной оценке работоспособности алгоритма АК RACE, как один из этапов предполетных испытаний.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, атмосферная коррекция, программное обеспечение, тестирование.

**METHOD OF CREATING TEST DATA FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF THE PERFORMANCE OF ATMOSPHERIC CORRECTION MODULES BASED
ON IMAGES OF FUNCTIONING SPACE VEHICLES**

Zashchepko P.A.^{1,2}, Zaitseva V.A.¹, Danilchenko A.Y.¹, Fiodartsau R.V.²

¹Peleng JSC

²Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus

Abstract. The software (SW) of spacecraft (SC) for remote sensing of the Earth (ERS) for processing target information (TI) includes many important modules and subroutines, one of which is the atmospheric correction (AC) module. This article presents a method for generating test data for the AC modules based on images obtained from spacecraft operating in orbit. In future works, it is proposed to use this method for generating test data in a comprehensive assessment of the operability of the AC RACE algorithm, as one of the stages of pre-flight testing.

Keywords: earth remote sensing, spacecraft, atmospheric correction, software, testing.

Адрес для переписки: *Защепко П. А., ул. Якуба Коласа, 22 к.1, г. Минск 220013, Республика Беларусь*
e-mail: *bntu@bntu.by*

Модули атмосферной коррекции. Обработка целевой информации (ЦИ) ДЗЗ является частью формирования достоверной информации о поверхности Земли. Обработкой ЦИ занимается специализированное программное обеспечение (ПО), которое организуется как последовательность модулей для выполнения своей тематической задачи. Одним из таких модулей является модуль атмосферной коррекции (АК). Конечными продуктами модуля АК являются расчет альбедо Земной поверхности [1] и получение информации об основных параметрах атмосферы по снимкам КА ДЗЗ [2].

Не смотря на основную цель АК (восстановление альбедо), модули АК имеют дополнительный функционал. В частности, для корректной работы в него входят создание: карт снежных пикселей, карт облачных пикселей, карт классификаций, карт аэрозольной оптической толщины (АОТ), карт содержания водяного пара и другое [2].

В Институте физики НАН Беларуси был разработан алгоритм АК RACE, который по снимкам низкого разрешения восстанавливает альбедо снимков высокого разрешения. Конкретно для данного алгоритма, который является примером

и объектом исследования, дополнительными результатами обработки являются: карта облачности и снега, значение АОТ и значение содержания водяного пара [3].

Оценка работоспособности АК. До момента проведения космической съемки и получения реальных данных в период предполетных испытаний необходимо выполнить тестирование модуля АК. Оценка работоспособности проводится на заранее подготовленных тестовых данных. Из-за отсутствия реальных снимков разрабатываемого КА, тестовые данные формируются из данных действующих КА со схожими спектральными диапазонами съемки.

Оценку работоспособности (или тестирование) модулей АК можно разделить на количественную и качественную составляющие.

Качественная оценка при тестировании модуля АК заключается в определении визуальных искажений (смазы, разрывы и другие артефакты изображений) [4, 6, 11] при обработке достаточно протяженных маршрутов съемки.

Количественная оценка АК подразумевает определение быстродействия работы заложенных алгоритмов и точности восстановления рассчитываемых параметров.

ваемых параметров (альбедо и атмосферных параметров). Для определения точности разрабатываемого модуля используют сравнения с данными другого ПО АК [4–8] или наземными измерениями [2, 4, 8–11].

Для облегчения обработки ЦИ модуль АК разделяет снимок на условные кадры (УК) и формирует выходные данные для каждого из них [1, 2].

При проведении АК по нескольким УК, составляющих маршрут съемки, возникает так называемая проблема мозаик («Mosaic Implications») [4]. Резкие перепады восстановленных значений атмосферных параметров и использование неточной интерполяции данных приводит к резким переходам в местах сшивания УК. Это вызывает необходимость тестирования модуля АК на достаточно протяженных маршрутах съемки и качественной оценке атмосферной коррекции ЦИ.

Для модуля АК RACE была проведена оценка точности восстановления альбедо по выборочным 22 УК космического аппарата Sentinel-2 разной местности с большим разнообразием объектов [5]. Было установлено, что модуль АК RACE сопоставим по эффективности восстановления альбедо с модулем АК космического аппарата Sentinel-2 (Sen2Cor).

Для полноценного тестирования модуля АК необходимо выполнить комплексную (качественную и количественную) оценку при обработке максимального по длительности маршрута съемки.

Тестовые данные для модулей АК. Как отмечалось выше, тестовые данные сформированные на основе функционирующего КА должны совпадать (или быть достаточно близки [5]) с спектральными диапазонами создаваемого (тестируемого) КА.

Для алгоритма АК RACE, на основе [5], за тестовые данные можно принять ЦИ Sentinel-2.

Ключевым этапом формирования тестовых данных является определение размера и положения участка маршрута на основе начальных параметров КА и съемочной системы. Основными характеристиками являются:

- высота и тип орбиты КА (для моделирования орбиты КА);
- проекция пикселя на Землю (GSD), м;
- ширина полосы захвата съемки (W), км;
- время съемки (T_c), с.

Скорость полета КА рассчитывается [12, 13]:

$$V_{КА} = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H}}, \quad (1)$$

где μ – произведение гравитационной постоянной на массу притягивающего тела (в данном случае Земли), называемое гравитационным параметром, m^3/c^2 ; R_3 – радиус Земли (в [12] – экваториальный, в [13] – средний), км; H – высота полета КА, км.

Заранее учитывается эллипсность Земли при использовании в расчете ее радиуса [14]:

$$R_{3,Г}(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cdot \cos(\varphi))^2 + (b^2 \cdot \sin(\varphi))^2}{(a \cdot \cos(\varphi))^2 + (b \cdot \sin(\varphi))^2}}, \quad (2)$$

где a – большая полуось Земли (экватор), км; b – малая полуось Земли (полюс), км; φ – широта, град.

На основе формул (1) и (2) выводится скорость КА подспутниковой точки (ПСТ):

$$V_{ПСТ}(\varphi) = V_{КА} \cdot \frac{R_{3,Г}(\varphi)}{R_3 + H}. \quad (3)$$

где $V_{КА}$ – скорость полета КА, км/с; $R_{3,Г}(\varphi)$ – радиус Земли, км.

В соответствии с параметрами орбиты КА формируются модели широты $\varphi(t)$ и долготы $\lambda(t)$ ПСТ зависящие от времени съемки T_c [15]. Устанавливается начальное положение ПСТ (при отсутствии требований, предлагается установить $\varphi(0) = \lambda(0) = 0$).

В зависимости от начальных требований (время съемки T_c , ширина полосы захвата W) и выведенной модели расчета широты и долготы ПСТ рассчитывается размер и положение интересующего участка маршрута.

Для алгоритма АК RACE сбор и формирование тестовых снимков по выведенному маршруту на основе снимков Sentinel-2 осуществляется через сайт Copernicus Open Access Hub [16]. Пример проекции имитируемого участка на маршрут Sentinel-2 приведен на рисунке 1.

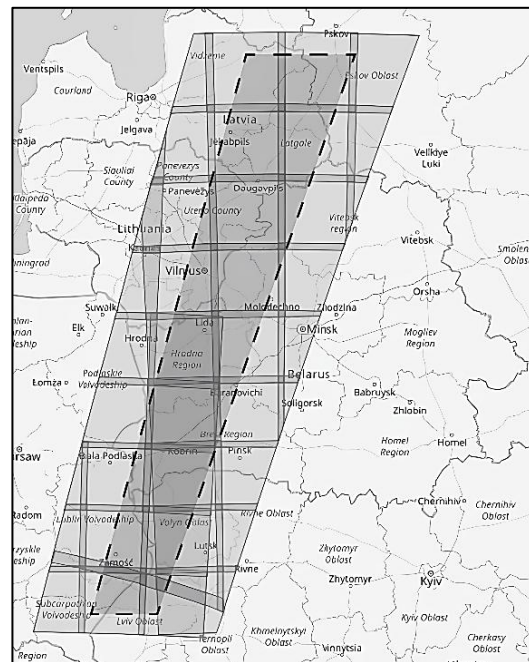


Рисунок 1 – Проекция имитируемой съемки (штриховая) на маршрут съемки КА Sentinel-2

Основными параметрами снимка являются: размеры снимка (длина и ширина в пикселях), координатная привязка пикселей, пространственное разрешение пикселей (GSD), значение пикселей скорректированные радиометрической коррекцией.

Данные, необходимые для проведения тестирования, включают в себя уровни обработки L1C (до АК, но после радиометрической коррекции) и L2A (после АК Sen2Cor, необходимы для сравнения). Файлы L2A можно получить непосредственно через сайт Copernicus или через обработку собранных изображений уровня L1C приложением SNAP с встроенным модулем Sen2Cor [17]. Кроме формирования изображений уровня обработки L2A, SNAP выполняет функцию редактора и инструмента сшивки и передискретизации снимков Sentinel-2, что позволяет упростить процесс формирования тестовых данных. Передискретизация также необходима для геометрического преобразования географических координат пикселя.

Необходимо отметить, что с учетом специфики работы спектральных каналов разрабатываемой ЦА проводится соответствующая им по специфике передискретизация изображений спектральных каналов ЦА функционирующих КА (для АК RACE: 10 м для основной ЦИ, 60 м для параметров атмосферы).

Кроме процесса сшивания снимков, необходима конвертация изображений в стандартный формат ДЗЗ (GeoTiff/Tiff).

Так как, ПО SNAP имеет ограничение при сохранении изображений в требуемый формат с большим объемом данных, необходимо воспользоваться дополнительным ПО ENVI [18], у которого отсутствует данное ограничение.

Для форматирования тестовых данных, можно использовать один из языков программирования (Python, C#, C++ или другие).

Заключение. Таким образом, была сформирована методика создания тестовых данных на основе снимков, функционирующих КА ДЗЗ. В качестве продолжения работы, предлагается практическое применение сформированного метода создания тестовых данных в комплексной оценке работоспособности алгоритма АК RACE, как один из этапов предполетных испытаний.

Литература

- ГОСТ Р 59759-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Радиометрическая коррекция данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Требование к алгоритмам. – Введ. 01.05.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 24 с.
- Sen2Cor for Sentinel-2 / M. Main-Knorn [et al.] // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII: proc. of SPIE. – Warsaw, 2017. – Vol. 10427. – Art. 1042704.
- A robust atmospheric correction procedure for determination of spectral reflectance of terrestrial surfaces from satellite spectral measurements / I. L. Katsev [et al.] // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, № 9. – Art. 1831.
- Smith, J. M. A Comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC Atmospheric Compensation Algorithms Using WorldView-2 Imagery / J. M. Smith // Department of Civil Engineering Master's Report. – University of Colorado, 2015. – 39 p.
- Защепко, П. А. Оценка абсолютной погрешности модуля атмосферной коррекции RACE по космическим снимкам со спутников Sentinel-2 / П. А. Защепко, В. А. Зайцева, Р. В. Федорцев // Фотоника. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 312–323.
- Lantzanakis, G. Comparison of physically and image based atmospheric correction methods for Sentinel-2 satellite imagery / G. Lantzanakis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9688. – Art. 968819.
- Cetin, M. A comparison of Atmospheric correction methods on Hyperion imagery in forest areas / M. Cetin, N. Musaoglu, O. H. Kocal // Uludag University Journal of the Faculty of Engineering. – 2017. – Vol. 22, № 1. – P. 103–114.
- Lantzanakis, G. Comparison of physically and image based atmospheric correction methods for Sentinel-2 satellite imagery / G. Lantzanakis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis // Perspectives on Atmospheric Sciences. – 2017. – P. 255–261.
- Evaluation of Sentinel-2A Surface Reflectance Derived Using Sen2Cor in North America / Y. Li [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 2357–2371.
- Pan, Y. Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms over Lakes for High-Resolution Multispectral Imagery: Implications of Adjacency Effect / Y. Pan, S. Bélanger, Y. Huot // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, № 13. – Art. 2979.
- Wang, D. Evaluation of five atmospheric correction algorithms for multispectral remote sensing data over plateau lake / D. Wang, B. H. Tang, Z. L. Li // Ecological Informatics. – 2024. – Vol. 82. – Art. 102666.
- Михайловский, К. В. Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли / К. В. Михайловский, М. А. Городецкий // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 361–372.
- Азаренок, Н. А. Расчет скорости движения космических аппаратов / Н. А. Азаренок, А. А. Михеева, В. В. Ялтыхов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. – 2005. – № 9. – С. 91–92.
- Grewal, M. S. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, A. P. Andrews, C. G. Bartone. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. – 608 p.
- Куренков, В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. – 296 с.
- Copernicus Browser: [сайт]. – URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата обращения: 27.08.2025).
- Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications / J. Segarra [et al.] // Agronomy. – 2020. – Vol. 10, № 5. – Art. 641.
- Li, X. Comparison of several remote sensing image classification methods based on ENVI / X. Li, L. Liu, L. Huang // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. XLII-3/W10. – P. 605–611.

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПО СТАНДАРТНЫМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Зикеев К. А.¹, Бурак В. А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены магнитные характеристики конструкционной стали 30ХГСА при различных режимах термообработки. Проведен анализ зависимостей магнитной проницаемости, коэрцитивной силы и магнитной индукции от температуры отжига. Показано, что коэрцитивная сила является наиболее информативным параметром для оценки структурных изменений, однако ее использование в высокотемпературной области ограничено нелинейностью зависимости. Для повышения точности предложено применение регрессионных моделей, учитывающих совокупность магнитных характеристик, что обеспечивает более надежную диагностику и расширяет возможности магнитной структуроскопии.

Ключевые слова: конструкционная легированная сталь; магнитная проницаемость; коэрцитивная сила; максимальная магнитная индукция; магнитная структуроскопия.

QUALITY CONTROL OF HEAT TREATMENT OF STRUCTURAL STEEL 30HGSA BY STANDARD MAGNETIC CHARACTERISTICS

Zikeev K.¹, Burak V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Institute of applied physics the NAS of Belarus

Minsk, Belarus

Abstract. The paper investigates the magnetic characteristics of structural steel 30HGSA under different heat treatment conditions. The dependence of magnetic permeability, coercive force, and magnetic induction on annealing temperature was analyzed. It was shown that coercive force is the most informative parameter for assessing structural changes, but its applicability is limited at high temperatures due to nonlinear behavior. To improve diagnostic accuracy, regression models incorporating multiple magnetic parameters are proposed, which provide more reliable evaluation and enhance the capabilities of magnetic structuroscopy.

Keywords: structural alloy steel; magnetic permeability; coercive force; maximum magnetic induction; magnetic structuroscopy

Адрес для переписки: Зикеев К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kzikееv@yandex.by

Контроль структуры и качества термообработки изделий, изготовленных из конструкционных марок сталей, является важной и актуальной задачей машиностроения. Неразрушающие методы структуроскопии являются одним из оптимальных направлений решения этой задачи на практике, одним из перспективных является магнитный метод контроля ферромагнитных материалов и изделий из них [1]. Большинство методов магнитного неразрушающего контроля использует стандартные магнитные характеристики. Однако основной сложностью при выборе метода является необходимость поиска информативных параметров, имеющих однозначную связь с механическими характеристиками или температурой термообработки, так как для большинства широко применяемых сталей характерна неоднозначная зависимость магнитных характеристик от температуры термообработки.

Конструкционная легированная среднеуглеродистая сталь 30ХГСА относится к тем маркам сталей, для которых стандартные магнитные характеристики неоднозначно зависят от температуры термообработки. Прокат из стали 30ХГСА согласно нормативным документам, подвергается

улучшению, то есть закалке с последующим отпусканием, или рекристаллизационному отжигу, который снимает внутренние напряжения.

Исследования проводились на образцах холоднокатаной стали 30ХГСА, имеющей форму пластин и подвергнутых отжигу при разных температурах в течение 2 часов. Образцы имели размеры $200 \times 17 \times 1,5$ мм³ и отжигались при температурах 200, 400, 500, 530, 560, 600, 650, 700, 730, 760, 800 и 900 °С.

Были измерены следующие магнитные характеристики: магнитная проницаемость (μ), коэрцитивная сила (H_c), максимальная магнитная индукция (B_r). Для них была изучена возможность однопараметрового контроля, полученный результат подтвердил вышесказанное, а для величины коэрцитивной силы зависимость от температуры отжига представлена на рисунке 1. Для этого параметра коэффициент корреляции с температурой составил: $R = 0,91$ и был самым высоким из рассматриваемых магнитных параметров.

В интервале 200–700 °С зависимость монотонная и устойчивая, что делает коэрцитивную силу надежным параметром для контроля, структуры

стали. В области высоких температур (730–900 °C) чувствительность метода снижается из-за нелинейных колебаний, что может затруднять точную диагностику.

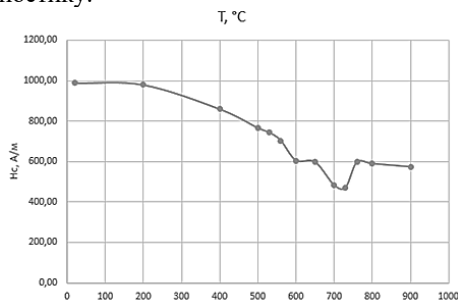


Рисунок 1 – Зависимость коэрцитивной силы образца стали 30ХГСА от температуры отжига

Из этого можно сделать вывод, что структуроскопии коэрцитивная сила используется как один из основных, но не единственный параметр: ее дополняют измерениями магнитной проницаемости, максимальной индукции или комплексными регрессионными моделями, которые учитывают несколько характеристик одновременно.

Для повышения точности контроля был использован статистический подход. По трем магнитным характеристикам было рассчитано уравнение линейной регрессии. Оно имеет следующий вид:

$$T = 778.963 + 0.7711 \cdot H_c + 5.63 \cdot 10^6 \cdot \mu - 675.077 \cdot B_r \quad (1)$$

Для рассчитанных по уравнению (1) значений, коэффициент корреляции составляет $R = 0,957$, а сама зависимость представлена на рисунке 2.

Из графика видно, что точки плотно располагаются вдоль диагонали, что подтверждает высокую точность модели. Незначительные отклонения проявляются в области высоких температур (760–900 °C), где модель слегка сглаживает нелинейные изменения свойств.

Поэтому можно сделать следующий вывод: модель адекватна и надежна для описания температурной зависимости в диапазоне 200–700 °C. В области высоких температур (760–900 °C) модель теряет чувствительность:

- фактические значения «скачут» из-за сложных фазовых изменений;
- это необходимо учитывать при практическом использовании: для диагностики в области высоких температур лучше применять нелинейные модели

или дополнительно использовать параметры, чувствительные к фазовым превращениям.

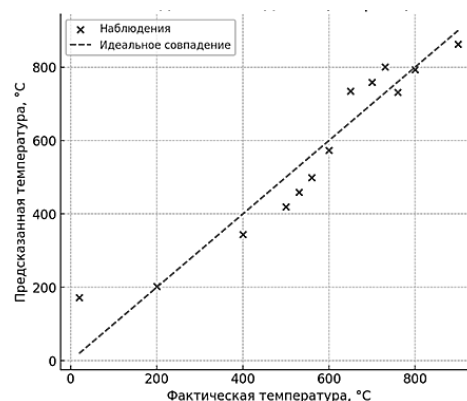


Рисунок 2 – Линейная регрессия для температуры как функции трех характеристик (H_c , μ , B_r)

Сравнивая полученные данные от обоих методов, можно сделать следующий вывод:

Корреляционный анализ (по одной характеристике): удобен для быстрой оценки, особенно с коэрцитивной силой (она наиболее информативна и легко измеряется).

Линейная регрессия: интегрирует информацию сразу из всех характеристик, обеспечивает более высокое качество прогноза температуры и лучше отражает комплексное влияние структуры материала.

Для повышенной точности и диагностики целесообразно использовать комбинированную регрессионную модель, где учитываются сразу три параметра. Это дает более надежный прогноз и позволяет минимизировать влияние случайных колебаний отдельных характеристик в диапазоне средних температур. Однако для задач структуроскопии, где критически важен контроль высокотемпературных структурных превращений, целесообразно использовать нелинейные модели обеспечивающие более высокую чувствительность к фазовым превращениям в верхнем температурном интервале или выбирать магнитные информативные параметры, которые обладают необходимой чувствительностью в области высоких температур.

Литература

1. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М. А. Мельгуй. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.

УДК 681

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КЛЕЙКИХ ЛЕНТ Иоффе К. В., Монич С. Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Одним из важнейших эксплуатационных показателей гибких клеящих материалов является усилие отслаивания от жесткой подложки. В данной работе было исследовано усилие отслаивания различных видов клейких лент от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания, рав-

ным 90°. В результате проведенных экспериментальных исследований были установлены значения адгезионной прочности различных клейких лент, что позволяет нам сделать вывод о целесообразности их применения в повседневной и промышленной деятельности.

Ключевые слова: адгезия, адгезионная прочность, клейкие ленты, изоляционные ленты.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ADHESIVE STRENGTH OF VARIOUS TYPES OF ADHESIVE BANDS

Ioffe K. V., Monich S. G.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. One of the most important performance indicators of flexible adhesive materials is the peel force from a rigid substrate. In this work, the peel force of various types of adhesive tapes from a rigid plate with a self-regulating peel angle of 90° was investigated. As a result of the conducted experimental studies, the values of the adhesive strength of various adhesive tapes were determined, which allows us to conclude that they are suitable for use in everyday and industrial activities.

Keywords: adhesion, adhesive strength, adhesive tapes, insulating tapes.

Адрес для переписки: Иoffee К. В., ул Гурского, 44/2, кв. 190, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kostya.ioffe@tut.by

Клейкие ленты – это универсальный и надежный материал, который широко используется в самых разных отраслях: от строительства и упаковки до электроники и медицины. В основе их работы лежит ключевое физико-химическое явление – адгезия, то есть процесс сцепления поверхностей разнородных материалов за счет межмолекулярных сил. Именно поэтому глубокое изучение адгезии крайне важно: оно позволяет создавать специализированные ленты с заданными свойствами – повышенной прочностью, термостойкостью, обратимостью сцепления или биосовместимостью, что открывает возможности для новых технологических применений.

Устройства определения усилия отслаивания. На рисунке 1 приведена принципиальная схема созданного устройства определения усилия отслаивания образца гибкого материала от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания. На массивном основании 1 на подшипниках качения 16 смонтирована подвижная горизонтальная каретка 2, на которой с помощью резьбовых прихватов закреплена жесткая пластина 3. На ее поверхности приклеен испытуемый образец гибкого материала 4, свободный конец которого закреплен в захвате 5. Посредством зацепов 6 последний жестко связан с тензометрическим датчиком усилия 7, который закреплён на каретке 8. На вертикальной стойке 14 устройства, которая для придания ей большей жесткости дополнительно соединена с основанием планкой 15, закреплён электродвигатель постоянного тока 10 с встроенным редуктором, вал которого посредством муфты 11 соединен с ходовым винтом 12. При вращении последнего с помощью передачи «винт-гайка» 13 каретке сообщается поступательное движение в направлении вертикальной оси по направляющим скольжения 9, которое создает усилия отслаивания испытуемого образца от жесткой пластины. Величина этого усилия за время отслаивания фиксируется тензометрическим датчиком и далее через усили-

тель подается на цифровой запоминающий осциллограф UTD2052CL. Изменение направления движения каретки обеспечивается реверсированием вращения вала электродвигателя, а регулирование скорости ее движения – изменением напряжения, подаваемого на него от блока питания UT3005E-3 [1].

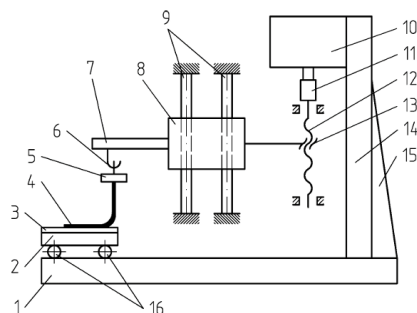


Рисунок 1 – Схема устройства определения усилия неравномерного отслаивания образца гибкого материала от жесткой пластины с саморегулируемым поддержанием угла отслаивания 90°



1 – ПВХ изолента «Онлайн»; 2 – изолента «Ермак»;
3 – клейкая лента «Ермак»; 4 – влагоустойчивая тканевая лента «Folsen»; 5 – лента клеящая монтажная «Ермак»; 6 – лента клейкая двухсторонняя вспенной основе «YourTools»; 7 – скотч малярный «Startul profi»

Рисунок 2 – Исследуемые образцы клейких лент

Калибровка измерительной установки выполняется путем последовательного подвешивания

эталонных грузов к захватному устройству с тензодатчиком. В процессе калибровки определяют зависимость между массой грузов и амплитудой сигнала на осциллографе, сохраняя постоянную скорость отслаивания материала.

Исследуемые образцы клейких лент. Во время проведения экспериментальных исследований были использованы разные виды клейких лент длиной 100 мм. В качестве жесткого основания использовалась пластина из фольгированного медью стеклотекстолита.

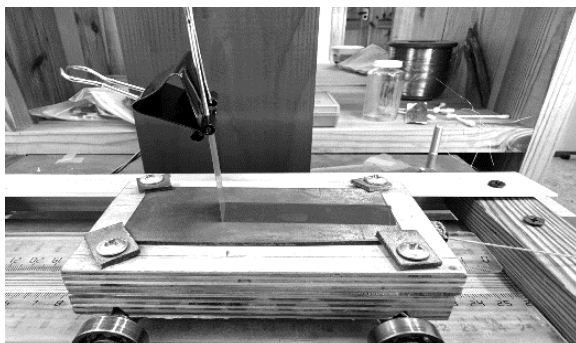


Рисунок 3 – Фотографии положения свободного конца испытуемого пластыря относительно вертикали отслаивания от жесткой пластины

Пластина с испытуемым образцом пластыря закреплялась на горизонтальной каретке устройства. Свободный конец образца фиксировался в пружинном зажиме. После этого на блоке питания устанавливалось необходимое значение напряжения питания электродвигателя 3,1 В, которому соответствует требуемая скорость перемещения свободного конца образца испытуемого пластыря. Затем включался электродвигатель на выполнение процедуры отслаивания образца испытуемого пластыря от пластины с непрерывной регистрацией на экране осциллографа усилия отслаивания за время проведения эксперимента

УДК 615.82

УСТРОЙСТВО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА ДЛЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Каменев З. А., Семенов Н. С., Мониц С. Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе рассматривается использование ударно-волновой терапии в медицине для лечения и профилактики заболеваний суставов и позвоночника. Представлена схема конструкции ударно-волнового генератора, дополненного лазерной системой, а также описан принцип его работы. Преимуществами данной конструкции являются низкая амплитуда полуволны отрицательного давления, снижение индуктивности рассеяния и возможность изменения длительности импульса.

Ключевые слова: ударно-волновая терапия, позвоночник, ударно-волновой генератор, лазерная система

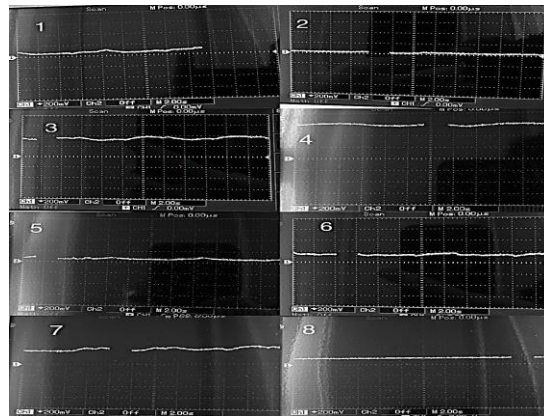
THE POSITIONING DEVICE FOR A LASER-BASED IMPACT WAVE GENERATOR

Kamenev Z. A., Semenov N. S., Monich S. G.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper discusses the use of shock wave therapy in medicine for the treatment and prevention of joint and spinal diseases. It presents a design scheme for a shock wave generator equipped with a laser system and describes its operation. The advantages of this design include a low negative pressure half-wave amplitude, reduced scattering inductance, and the ability to adjust the pulse duration.

Результаты исследований. На рисунке 4 милливольт равен 0,0163 Н. Следовательно, по результатам проведенных экспериментальных исследований были установлены средние величины усилия, равные: для 1 – 1,304 Н; 2 – 0,0489 Н; 3 – 5,542 Н; 4 – 9,78 Н; 5 – 1,41 Н; 6 – 2,119 Н; 7 – 4,401 Н.



1 – ПВХ изолента «Онлайн»; 2 – изолента «Ермак»; 3 – клейкая лента «Ермак»; 4 – влагоустойчивая тканевая лента «Folsen»; 5 – лента клеящая монтажная «Ермак»; 6 – лента клейкая двухсторонняя вспенной основе «YourTools»; 7 – скотч малярный «Startul profi»; 8 – гиря 200 г

Рисунок 4 – Показания осциллографа

В результате исследования показаний осциллографа была установлена количественная зависимость между массой грузов и показаниями осциллографа при постоянной скорости отслаивания.

Литература

1. Киселев, М. Г. Устройство определения усилия неравномерного отслаивания клеевого слоя гибких материалов от жесткой пластины / М. Г. Киселев, П. С. Богдан, С. Г. Мониц, Я. В. Янкина. – 2020. – 5 с.

Keywords: shock wave therapy, spine, shock wave generator, laser system

Адрес для переписки: Монич С. Г., ул. Я. Коласа, 22/1-302, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

Ударно-волновые технологии играют ключевую роль в медицине (литотрипсия, физиотерапия), в исследовании прочностных характеристик материалов, а также в технологических процессах лазерной обработки и модификации поверхностей. Для инициирования ударной волны часто используется ударный импульс высокой интенсивности, фокусируемый на ограниченной площади мишени или в объеме жидкости. Эффективность генерации определяется пространственной локализацией точки фокусировки ударного импульса относительно активной зоны устройства. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированных систем позиционирования, обеспечивающих субмиллиметровую точность наведения и воспроизводимости координат.

Для генерации ударных волн применяется ряд физических механизмов, среди которых особое место занимает лазерно-индуцированный способ. Он основан на фокусировке мощного лазерного импульса в ограниченном объеме жидкости или на поверхности мишени, что приводит к быстрому образованию плазмы, последующему расширению кавитационного пузыря и генерации высокоамплитудного акустического импульса.

Ключевым фактором, определяющим эффективность и стабильность генерации, является пространственное позиционирование точки фокусировки лазера. Даже минимальные смещения приводят к изменению амплитуды и формы ударной волны. Это обуславливает необходимость разработки высокоточных систем позиционирования, интегрированных в состав ударно-волнового генератора.

Точность формирования ударной волны зависит от параметров ударного импульса (длина волны, длительность импульса, энергия, диаметр пятна фокусировки) и геометрии оптической системы. Малейшее смещение оптической оси относительно рабочей поверхности приводит к вариациям давления и энергии ударного фронта. Для компенсации подобных отклонений применяется система позиционирования, включающая:

Устройство позиционирования для лазерного ударно-волнового генератора можно условно разделить на пять функциональных блоков, работающих в единой системе:

1. Лазерный блок и оптическая система для генерации и фокусировки лазерного импульса в зоне формирования ударной волны, на основе лазерного источника (Nd:YAG, Ti:Sa или волоконный импульсный лазер, $\lambda = 532\text{--}1064$ нм, длительность импульса от наносекунд до фемтосекунд).

2. Прецизионная механическая система позиционирования для обеспечения пространственного наведения лазерного пучка или перемещения объекта с высокой точностью.

3. Сенсорный комплекс контроля положения для отслеживания фактической зоны фокусировки лазера и регистрация сдвигов.

4. Программно-аппаратный модуль управления для обработки сигналов сенсоров и управление исполнительными механизмами на основе микроконтроллера с алгоритмами машинного зрения и системой ПИД-регулирования.

5. Рабочая камера и зона генерации ударной волны в среде, в которой формируется ударный акустический импульс, включающий в себя прозрачную камеру с жидкостью (обычно дистиллированная вода или физиологический раствор).

Устройство относится к области травматологии и ортопедии и предназначено для лечения заболеваний, вызванных нарушением обменных процессов в области суставов конечностей и позвоночника (остеохондроз, сколиоз, травмы и др.). Экстракорпоральная ударно-волновая терапия позволяет снижать болевой синдром, улучшать кровообращение и стимулировать регенерацию тканей.

Принцип работы устройства. С помощью схемы управления задаются параметры импульса (длительность, частота следования, амплитуда). При подаче импульса на катушку индуктивности 1 создается магнитное поле, в результате чего сердечник со штоком 2 движется внутрь катушки. Данный импульс фокусируется акустической линзой 4 в фокальной точке F, создавая ударную волну.

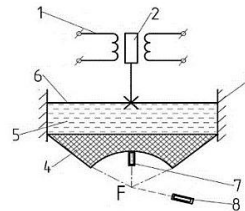


Рисунок 1 – Схема ударно-волнового генератора

Лазерная система интегрирована в конструкцию устройства для точного контроля фокусировки ударной волны и дополнительной стимуляции тканей в зоне воздействия. Лазер может работать в нескольких режимах: направленного облучения, предварительного нагрева тканей для увеличения их восприимчивости к ударным волнам, а также как вспомогательный элемент для визуализации зоны обработки.

При подаче импульса на катушку 1 создается магнитное поле, вызывающее движение сердечника 2. Ударная волна фокусируется линзой 4 в точке F. Лазерный модуль 7 предварительно обрабатывает ткани в зоне воздействия, снижая их сопротивление и усиливая терапевтический эффект. Волна передается пациенту через водную подушку 5. Охлаждающая система предотвращает перегрев компонентов. Так же, если в конструкции предусмотрен модуль 8,

то он используется для диагностики и контроля, он помогает визуализировать рабочую область, а также использоваться в оптических методах контроля

Таким образом, усовершенствованная конструкция ударно-волнового генератора с лазерной системой расширяет терапевтические возможности метода, улучшая его эффективность и безопасность.

Принцип работы устройства.

Работа системы строится на цикле:

– Установка исходного положения объектива или мишени.

– Фокусировка лазера в предполагаемой зоне генерации.

– Регистрация фактической точки фокусировки средствами визуального контроля.

– Сравнение реального положения с заданным и формирование корректирующего сигнала.

– Автоматическая подстройка координат с обеспечением совпадения оптической оси и рабочей зоны.

– Генерация лазерного импульса и формирование ударной волны.

Разработанное устройство позиционирования является ключевым элементом ударно-волнового

генератора, использующего лазерный источник света. Его применение обеспечивает точный контроль зоны фокусировки, что приводит к стабильному и воспроизводимому формированию ударного акустического импульса.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией систем адаптивной оптики и интеллектуальных алгоритмов машинного зрения, что позволит повысить эффективность и расширить области применения ударно-волновых технологий.

Литература

1. Васильев, А. Ю. Экстракорпоральная ударно-волновая терапия в лечении травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата / А. Ю. Васильев, Е. А. Егорова. – М.: Медицина, 2005. – 93 с.
2. Vogel, A. Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues / A. Vogel, V. Venugopalan // Chemical Reviews. – 2003. – Vol. 103, № 2. – P. 577–644.
3. Минкин, Р. Б. Лазерно-индуцированные ударные волны: физика и приложения / Р. Б. Минкин, В. Н. Глазков. – М.: Наука, 2017. – 320 с.
4. Lauterborn, W. Physics of bubble oscillations and cavitation / W. Lauterborn, T. Kurz // Reports on Progress in Physics. – 2010. – Vol. 73, № 10. – Art. 106501.

УДК 517.9

ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН ВСЛЕДСТВИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Князев М. А., Блинкова Н. Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены волновые процессы, возникающих при изменении квадрупольного момента массивного источника, излучающего гравитационную волну. Особое внимание уделено поляризации волн. Показано, что, если в начальный момент времени волна является монохроматической и плоской, то в случае, когда в уравнениях Эйнштейна учитываются только линейные малые поправки к метрическому тензору, существует только одна составляющая поляризации. Однако, если учесть поправки второго порядка, то появляются две компоненты поляризации и они оказываются зависящими друг от друга. Это можно объяснить криволинейным характером пространства-времени. С математической точки зрения такое поведение поляризации обусловлено нелинейностью обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего новую компоненту. Ранее высказывалось предположение о том, что в квадратичном приближении эта компонента теряет свойство периодичности. Точное аналитическое решение рассматриваемого нелинейного уравнения показывает, что, хотя амплитуда колебаний уменьшается, тем не менее колебательный характер функций, описывающих обе компоненты поляризации, сохраняется.

Ключевые слова: гравитационная волна, поляризация, квадратичное приближение, нелинейность.

VARIATION OF THE PERIODICITY FOR MONOCHROMATIC WAVES DUE TO NONLINEARITY OF EQUATIONS OF MOTION

Knyazev M. A., Blinkova N. G.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Wave processes due to a violation of quadrupole momentum of massive source are considered. A special attention is paid to the problem of wave polarization. It is shown that if at initial time a wave is plane and monochromatic then there is only one component of polarization. This polarization appears as a result of accounting the linear corrections to the metrics in the Einstein equations. If one account the second-order corrections, the two components of polarization are appeared. Such situation may be explained by nonlinear character of space-time. From mathematical point of view, it may be explained by nonlinearity of the ordinary differential equation for the new second component. Early it was mentioned that an accounting of the second-order corrections leads to the lost of the periodicity of polarization. An exact analytical solution of the equation under consideration demonstrates that the periodical character of polarization takes a place but an amplitude of oscillations is becoming less.

Keywords: gravity wave, polarization, second-order approximation, nonlinearity.

Адрес для переписки: Князев М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maknyazev@bntu.by

В работе построено общее решение нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ) вида

$$2yy'' + y'^2 = M \cos^2(kt) - N, \quad (1)$$

где M и N – положительные константы, определяемые моделью рассматриваемой задачи, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, штрих обозначает дифференцирование по времени.

Уравнения такого вида возникают при изучении распространения гравитационных волн в классической ОТО [1].

Если рассмотреть уравнение движения для гравитационной волны в двух измерениях (x, t) , то соответствующее уравнение Эйнштейна допускает, что поляризация гравитационной волны, обусловленной изменением составляющих квадрупольного момента источника, излучающего такую волну, в линейном приближении по малым поправкам к метрическому тензору может быть представлена в виде суммы двух независимых составляющих [2].

Обе эти составляющие являются линейными и периодическими функциями времени. Однако уже в квадратичном приближении по вышеупомянутым малым поправкам к метрическому тензору, предположение о независимости обеих составляющих поляризации не выполняется [3]. Это выражается в появлении некоторого нелинейного дифференциального соотношения достаточно сложного вида, которое описывает взаимную связь между двумя компонентами поляризации.

Предполагая, что в начальный момент времени испущенная волна является монохроматической и плоской, получаем, что она имеет только одну составляющую поляризации.

Учет квадратичного приближения как раз и приводит к уравнению (1), которое описывает поведение другой компоненты поляризации (мы обозначаем ее через y), появляющейся вследствие учета поправок второго порядка. Существует предположение, что учет этой второй составляющей поляризации гравитационных волн будет способствовать их более эффективному детектированию.

Уравнение (1) описывает поведение одной из компонент поляризации в квадратичном приближении. Это уравнение является нелинейным ОДУ второго порядка. Чтобы проанализировать его решение, перепишем это уравнение в виде

$$yy'' + \frac{y'^2}{2} = \frac{M}{2} \cos^2(kt) - \frac{N}{2}. \quad (2)$$

Тогда, если ввести замену зависимой переменной вида вида [4]

$$y^{3/2} = w, \quad (3)$$

уравнение (2) можно записать следующим образом

$$w'' = \frac{M}{2} \cos^2(kt) - \frac{N}{2}. \quad (4)$$

Данное уравнение допускает разделение переменных и его можно проинтегрировать явным образом [5]. В результате двукратного интегрирования получается следующее выражение для функции w :

$$w = \left(\frac{M}{8} - \frac{N}{2}\right)t^2 + C_1 t - \frac{M}{8k^2} \cos(2kt) - \frac{MC_2}{2k^2}. \quad (5)$$

Здесь C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые определяются начальными условиями задачи. Полученное выражение позволяет найти явный вид искомой функции y :

$$y = \left[\left(\frac{M}{8} - \frac{N}{2}\right)t^2 + C_1 t - \frac{M}{8k^2} \cos(2kt) - \frac{MC_2}{2k^2}\right]^{2/3}. \quad (6)$$

Ясно, что полученное соотношение (6) представляет собой общее решение уравнения (1), поскольку оно содержит две независимые постоянные. Наличие иррациональности в этом решении естественным образом объясняется нелинейным характером исходного уравнения. При этом, поскольку извлекается корень третьей степени, подкоренное выражение может быть как больше, так и меньше нуля.

Однако, поскольку это подкоренное выражение представляет собой квадратичную функцию, знак не имеет принципиального значения.

Было высказано предположение, что учет поправок второго порядка приводит к тому, что возникающая составляющая поляризации перестанет быть периодической функцией времени, несмотря на периодичность в поведении квадрупольного момента источника излучения [1].

Однако, как следует из полученного точного решения (6), хотя амплитуда колебаний уменьшается, так как растет параметр k , тем не менее полностью периодический характер зависимости поляризации от времени не исчезает. Можно предположить, что учет поправок еще более высокого порядка к метрическому тензору усилит эффект сглаживания колебаний.

Литература

1. Poplawski, N. J. On the polarization of nonlinear gravitational waves / N. J. Poplawski // arXiv:1110.005 [gr-qc]. – 2011. – 3 p.
2. Ландау, Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1973. – 504 с.
3. Poplawski, N. J. Michelson interferometer in the field of a plane gravitational wave / N. J. Poplawski // Journal of Mathematical Physics. – 2006. – Vol. 47, № 7. – P. 072501.

4. Зайцев, В. Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

5. Матвеев, Н. М. Сборник задач и упражнений по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Н. М. Матвеев. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 319 с.

УДК 621.396

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИЙ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Книга Н. А., Савелов И. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к обеспечению тепловых условий эксплуатации герметичных электронных устройств, работа которых осложняется отсутствием естественной конвекции и ограниченным теплообменом с окружающей средой. Дается характеристика основных методов отвода тепла: теплопроводности корпуса, жидкостного охлаждения, тепловых труб, фазопереходных материалов и активных систем на основе модулей Пельтье и принудительной циркуляции. Отмечаются их преимущества и ограничения, а также особенности применения в условиях повышенных требований к надежности, вибропрочности и температурной стабильности аппаратуры.

Ключевые слова: герметичные устройства, тепловой режим, системы охлаждения, фазопереходные материалы, надежность.

THERMAL MANAGEMENT OF HERMETICALLY SEALED ELECTRONIC DEVICES

Kniga N. A., Savelov I. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarusity

Abstract. The article considers approaches to ensuring the thermal conditions of hermetically sealed electronic devices, where the absence of natural convection and limited heat exchange with the environment complicate operation. A characterization of the main cooling methods is provided, including case heat conduction, liquid cooling, heat pipes, phase-change materials, and active systems based on Peltier modules and forced circulation. Their advantages and limitations are outlined, as well as the specific features of application under demanding conditions of reliability, vibration resistance, and temperature stability of electronic equipment.

Keywords: hermetic devices, thermal regime, cooling systems, phase-change materials, reliability.

*Адрес для переписки: Книга Н. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: catomile281@gmail.com*

Современные радиоэлектронные устройства характеризуются высокой степенью интеграции и ростом плотности размещения элементов, что сопровождается увеличением тепловыделения. Обеспечение оптимального теплового режима является одним из наиболее значимых факторов надежности, поскольку перегрев компонентов приводит к деградации материалов, изменению электрических характеристик и сокращению ресурса эксплуатации. По данным эксплуатационных наблюдений, доля тепловых отказов в сложных системах может достигать 40–50 % [1]. Особенно остро проблема проявляется в герметичных конструкциях, где естественная конвекция исключена, а теплообмен с окружающей средой ограничен. Дополнительную сложность создают тяжелые условия эксплуатации: вибрационные и ударные нагрузки, резкие перепады температуры, воздействие радиации и работа в условиях вакуума. Все это требует от разработчиков решений, обеспечивающих эффективный и устойчивый отвод тепла при сохранении герметичности и общей надежности аппаратуры.

Целью данной работы является оптимизация системы охлаждения герметичных электронных устройств при их функционировании в условиях интенсивного воздействия внешних воздействий.

Одним из самых распространенных технических решений рассеивания выделяемой тепловой

энергии в электронных устройствах является применение кондукции. Как показывает практика, эксплуатации электроники в сложных условиях и в больших радиоэлектронных системах, применяются несущие конструкции и защитные корпуса, выполненные из алюминиевых и медных сплавов, которые выполняют роль естественных теплоотводов, обеспечивая передачу энергии от внутренних источников к внешней поверхности. Достоинствами такого подхода являются простота, отсутствие энергопотребления и высокая надежность. Вместе с тем эффективность метода ограничена тепловыми нагрузками и условиями окружающей среды: при высокой температуре воздуха корпус перестает обеспечивать требуемый уровень охлаждения. Для снижения теплового сопротивления применяются термоинтерфейсные материалы, однако их долговременная стабильность ограничена процессами старения.

Для более мощных устройств применяются жидкостные методы охлаждения. Заполнение герметичного объема диэлектрическими жидкостями позволяет совместить теплопроводность с конвекционным переносом тепла, обеспечивая более равномерное температурное поле. Этот метод востребован в преобразовательных системах, радиочастотных усилителях и энергетических установках, где плотность тепловых потоков особенно высока [2]. Его преимуществом является

эффективность охлаждения, однако ограничивающими факторами остаются увеличение массы, усложнение процессов герметизации и необходимость обслуживания.

Значительное внимание уделяется методам, основанным на фазовых переходах.

Тепловые трубы и испарительные камеры используют скрытую теплоту испарения для переноса энергии от источника к стенкам корпуса. Эти системы отличаются высокой эффективностью и долговечностью, благодаря чему нашли применение в космической технике и телекоммуникационных системах [3]. Вместе с тем они технологически сложны и чувствительны к ориентации устройства в гравитационном поле. Близким по принципу методом является применение фазопереходных материалов, аккумулирующих тепло за счет плавления. Они позволяют сглаживать температурные пики в системах с переменной нагрузкой, но обладают ограниченной теплоемкостью и требуют восстановления исходной фазы.

Активные методы охлаждения находят применение в случаях, когда пассивных решений оказывается недостаточно. Наиболее известными являются термоэлектрические модули Пельтье, используемые в оптоэлектронных комплексах, лазерной аппаратуре и измерительных системах. Их достоинством является точность регулирования температуры, однако недостатками выступают энергопотребление и усложнение конструкции [4]. Другим направлением остаются системы с принудительной циркуляцией жидкого теплоносителя, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла. Подобные решения применяются в военной электронике и энергетике, где тепловые потоки предельно высоки, но наличие подвижных элементов и необходимость дополнительного энергоснабжения ограничивают их использование в компактных устройствах.

Следует подчеркнуть, что эффективность охлаждения определяется не только выбранным методом, но и конструктивными решениями. На стадии проектирования используются тепловые расчеты и моделирование, позволяющие прогнозировать распределение температур и оптимизировать размещение компонентов. Такой подход обеспечивает снижение локальных перегревов еще на раннем этапе и повышает общую эффективность системы [5].

Современные разработки направлены на интеграцию интеллектуальных систем управления тепловыми процессами. Датчики температуры, термисторы и микроконтроллеры позволяют в реальном времени отслеживать тепловое состояние устройства и динамически регулировать работу активных элементов. Такой подход открывает возможности для создания адаптивных систем охлаждения, способных подстраиваться под переменные нагрузки и внешние условия, что особенно важно для космических и военных приложений.

Перспективным направлением остается применение новых материалов с уникальными тепловыми свойствами, включая нанокompозиты, графеновые покрытия и сплавы с управляемой анизотропией теплопроводности. Комбинация этих материалов с пассивными и активными методами охлаждения позволяет существенно повысить надежность, продлить ресурс эксплуатации и уменьшить габариты аппаратуры, сохраняя при этом требуемую температурную стабильность.

Таким образом, обеспечение тепловых условий в герметичных электронных устройствах представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую сочетания пассивных и активных методов, конструктивной оптимизации и внедрения современных материалов и интеллектуальных систем управления. Комбинированный подход остается наилучшим решением для достижения высокой надежности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры в условиях повышенных требований к температурной стабильности, вибропрочности и эксплуатационной надежности.

Литература

1. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства: учеб. пособие / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 134 с.
2. Дульнев, Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 152 с.
3. Дульнев, Г. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры: учебник / Г. Н. Дульнев, Н. Н. Тарновский. – Ленинград: Энергия, 1975. – 200 с.
4. Майданик, Ю. Ф. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для систем охлаждения электроники / Ю. Ф. Майданик // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 58–69.
5. Шарков, А. В. Системы охлаждения и термостатирования / А. В. Шарков, В. А. Кораблев, В. В. Герасютенко. – СПб.: Университет ИТМО, 2021. – 216 с.

УДК 530.182

ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ В МОДЕЛИ φ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ И УЧЕТЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ Князев М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена модификация нелинейного уравнения в модели φ^4 , в которой одновременно рассматриваются эффект нарушения Лоренц-инвариантности и возможность существования диссипативных процессов в различных пространственных точках системы в один и тот же времени. Построено явное

аналитическое выражение топологически нетривиальное решение нового уравнения. Показано, что в такой системе возможна ситуация, при которой один из параметров решения, а именно ω , оказывается независимым явным образом от коэффициента диссипации.

Ключевые слова: Кинк, модель ϕ^4 , нарушение Лоренц-инвариантности, метод Хироты.

TOPOLOGICALLY NON-TRIVIAL SOLUTION IN ϕ^4 MODEL WITH LORENTZ-INVARIANCE VIOLATION AND SPATIAL DISSIPATION

Knyazev M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The modification of nonlinear equation of motion in ϕ^4 – model with violation of the Lorentz-invariance and spartial dissipation at the same moment of time is considered. An explicit analytical expression for topologically nontrivial solution of this equation is constructed. A possibility when one of the parameters of solution does not depend on the coefficient of dissipation is demonstrated.

Keywords: Kink, model ϕ^4 , Lorentz-invariant violation, Hirota method.

*Адрес для переписки: Князев М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maknyazev@bntu.by*

В современной физике требование инвариантности уравнений движения относительно преобразований Лоренца является общепринятым. Однако существует и достаточное количество процессов, которые, как следует из экспериментальных исследований, протекают с нарушением этого требования. В работе [1] кратко приводится перечень таких проблем.

Модель ϕ^4 теории поля относится к числу наиболее распространенных методов теоретико-полевого описания явлений в различных областях исследований [2–4]. Уравнение движения в этой модели является Лоренц-инвариантным. Однако, в последнее время появляются работы, в которых учитывается возможность нарушения Лоренц-инвариантности в уравнении движения модели ϕ^4 . Так, в работе [5] рассмотрена простейшая модификация этого уравнения в виде

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (1)$$

где $\phi_{xx} = \partial^2\phi/\partial x^2$ и т.п. Параметр β является положительной константой и описывает нарушение Лоренц-инвариантности. В работе [5] показано, это уравнение инвариантно относительно преобразования

$$x' = \gamma(x_0 - ut),$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1 - u^2 + 2\beta u}$, а его топологически нетривиальное решение имеет вид

$$\phi(x, t) = \tanh[\gamma(x - ut - x_0)].$$

Вопрос о возможности построения связанных состояний кинков и/или антикинков в настоящее время является открытым.

Дальнейшие исследования нарушения Лоренц-инвариантности в модели ϕ^4 могут быть связаны с обобщением вида потенциала путем учета более высоких порядков или деформирования известного потенциала. Значительный интерес представляет также такая модификация уравнения (1), при которой вид потенциала сохраняется неизменным и одновременно учитываются и процессы диссипации.

В работе [1] рассмотрена модификация уравнения (1) вида

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \alpha\phi_t + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (2)$$

учитывающая диссипативные процессы, и построено в явном виде аналитическое решение данного уравнения. Решение этого уравнения имеет вид

$$\phi(x, t) = \frac{k}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{kx - \omega t + \eta_0}{2}\right) \right], \quad (3)$$

где $k = -\frac{3}{4\alpha\beta^2}$, $\omega = -\frac{3}{2\alpha}$, а параметр η_0 характеризует начальное положение решения.

В настоящей работе рассмотрена модификация уравнения (1) следующего вида

$$\phi_{tt} - \phi_{xx} + \gamma\phi_x + 2\beta\phi_{xt} - \phi + \phi^3 = 0, \quad (4)$$

где параметр γ является положительной константой и характеризует возможность существования диссипативных процессов в различных пространственных точках системы в один и тот же момент времени. Для решения уравнения (4) использовалась модификация прямого метода Хироты решения нелинейных уравнений в частных производных, предложенная в работе [7].

Формально решение уравнения (4) имеет такой же внешний вид, как и решение (3) уравнения (2). Однако параметры решения принимают другие значения. Согласно использованному методу при построении решения типа одиночного кинка параметры k и ω решения определяются через уравнения вида

$$k\omega^2 - k^3 + \gamma k^2 - 2\beta k^2\omega - k = 0,$$

$$\omega^2 - 2\beta k\omega - k^2 + \gamma k = 0.$$

Используя два последние алгебраические уравнения, можно показать, что

$$\omega = \frac{1 - 2k^2}{2(4\beta k + 2)},$$

При этом параметр k может принимать произвольное значение. Хотя коэффициенты γ и β модели

явно определяют параметр решения k , параметр решения ω зависит непосредственно только от β . Зависимость параметра ω от γ представлена только опосредствовано. Таким образом, возможна ситуация, в которой состояние, описываемое топологически нетривиальным решением уравнения (4), не будет зависеть от того, как протекают диссипативные процессы в пространстве.

Отметим, что в случае учета временных диссипативных процессов (уравнение (2)) или без их учета вовсе (уравнение (1)) такая ситуация не имеет места. И для уравнения (1), и для уравнения (2) параметры решения k и ω однозначно определяются через коэффициенты модели. Вследствие этого вопрос о существовании решения, описывающего связанное состояние хотя бы двух топологически нетривиальных решений, для этих нелинейных уравнений в настоящее время остается открытым. В тоже время произвол при выборе параметра k для решения уравнения (4) предоставляет хорошую возможность, чтобы построить связанное состояние не только двух кинков (антикинов) или кинка и антикинка, но и произвольного числа топологически не тривиальных одиночных объектов.

Все вышесказанное позволяет рассматривать нелинейные уравнения при учете диссипативных процессов как такие уравнения, которые допускают существование решений в виде связанных состояний, т. е. относятся к интегрируемым нелинейным уравнениям [8]. Как известно, решение, описывающее связанное состояние произвольного числа одиночных топологически нетриви-

альных состояний можно построить, если в системе имеет место баланс между нелинейностью и дисперсией. Такой баланс можно установить разными путями. Можно учесть в модели более высокие порядки нелинейности (и не только для потенциала). Однако нам представляется более перспективным по возможности более полный учет диссипативных процессов. Чем больше диссипативных процессов, связанных с переносом энергии, принимаются во внимание в той или иной задаче, тем проще установить баланс, позволяющий построить связанные состояния.

Литература

1. Князев, М. А. Топологически нетривиальное состояние в диссипативной модели ϕ^4 с нарушением Лоренц-инвариантности / М. А. Князев // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 347–352.
2. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – М.: Мир, 1986. – 416 с.
3. Додд, Д. Солитоны и нелинейные волновые уравнения / Д. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Моррис. – М.: Мир, 1988. – 694 с.
4. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур. – М.: Мир, 1987. – 479 с.
5. Yan, H. Kink-antikink collision in a Lorentz-violating ϕ^4 model / H. Yan, Y. Zhong, Y.-X. Lui, K.-i. Maeda // Physics Letters B. – 2020. – Vol. 807, № 10. – P. 135542.
6. Barreto, M. N. Defect structures in Lorentz and CPT violating scenarios / M. N. Barreto, D. Bazeia, R. Menezes // Physical Review D. – 2006. – Vol. 73, № 6. – P. 065015.
7. Князев, М. А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М. А. Князев. – Минск: Тэхналогія, 2003. – 116 с.
8. Инфельд, Э. Нелинейные волны, солитоны и хаос / Э. Инфельд, Дж. Роуланс. – М.: Физматлит, 2005. – 480 с.

УДК 621

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА

Колонтаева Т. В.¹, Сергиевич О. А.², Гвоздева Н. А.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы изучены свойства изоляционной композиционной керамики на основе сочетания кристаллических фаз кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) и целзьяна ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) в четырехкомпонентной системе $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Подобраны оптимальные режимы термообработки керамических образцов. Установлено влияние температуры и продолжительности обработки на удельное электросопротивление. Изучен фазовый состав оптимальных составов и микроструктура.

Ключевые слова: кордиерит, целзьян, спекание, электросопротивление, микроструктура.

DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF INSULATING COMPOSITE CERAMICS ON SYNTHESIS PARAMETERS

Kolontaeva T. V.¹, Sergievich O. A.², Gvozdeva N. A.²

¹ Belarusian National Technical University

² Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research work, the properties of insulating composite ceramics based on a combination of crystalline phases of cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) and celzian ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) in the four-component system $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ were studied. The optimal modes of heat treatment of ceramic samples were

selected. The effect of temperature and duration of processing on the specific electrical resistance was established. The phase composition of the optimal compositions and microstructure have been studied.

Keywords: cordierite, celzian, sintering, electrical resistance, microstructure.

Адрес для переписки: Колонтаева Т. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tatkolontaeva@mail.ru

На основании аналитического обзора литературы синтез материалов проводился на основе сочетания кристаллических фаз кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) и цельзиана ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) в четырехкомпонентной системе $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Заданное соотношение кристаллических фаз с составом оксидов представлено в таблице 1.

Согласно химическому составу исходных смесей и используемому сырью можно сделать вывод, что механизм процесса спекания и переноса вещества в изучаемой системе сложный. Преобладает жидкофазное спекание с переносом вещества путем вязкого течения расплава. Спекание керамических материалов сопровождается процессом уплотнения, который условно можно разделить на три стадии.

На первой стадии из введенных в массу компонентов при определенной температуре образуется жидкая фаза. Ее появлению способствуют примесные оксиды натрия и калия, участвующие в образовании легкоплавких эвтектик. Жидкая фаза вначале имеет низкую вязкость. Возникающие при этом капиллярные силы способствуют максимальной упаковке за счет уменьшения площади поверхности пор. Уплотнение системы происходит, в том числе, под действием сил поверхностного натяжения.

Вторая стадия уплотнения образцов связана с вторичной кристаллизацией. Новые зерна разделены жидкофазными прослойками (пленками). За счет отрицательного радиуса кривизны возникает давление, способствующее уплотнению структуры.

Количество расплава увеличивается за счет растворения аморфизированного кремнезема, образующегося при разложении глинистых минералов, а также за счет растворения BaO , появляющегося при разложении BaCO_3 . В расплав также вовлекается Al_2O_3 . При этом растворяются участки зерен, главным образом выпуклые, находящиеся в контакте с жидкой фазой, что обуславливает сближение их центров и перемещение жидкости в промежутки между зернами.

Таблица 1 – Химический состав опытных масс

№	Кордиерит: цельзиан, %	$\text{MgO}:$ BaO , мол. доли	Содержание, %			
			MgO	BaO	Al_2O_3	SiO_2
1	100:1	1:0	13,7	—	34,9	51,3
2	90:10	0,9:0,1	12,3	4,0	34,1	49,4
3	80:20	0,8:0,2	10,9	8,1	33,3	47,5
4	70:30	0,7:0,3	9,5	12,2	32,6	45,5
5	60:40	0,6:0,4	8,2	16,3	31,8	43,6
6	50:50	0,5:0,5	6,8	20,4	31,0	41,6

На завершающей стадии спекания заканчиваются физико-химические процессы. Твердые частицы смачиваются жидкой фазой, которая проникает в поры. Результатом перекристаллизации является образование кристаллического каркаса керамических образцов.

Одним из наиболее важных эксплуатационных свойств электроизоляционной керамики является удельное объемное электросопротивление. Керамические материалы в большинстве случаев имеют ионное строение, поэтому для них характерна ионная проводимость. Ионы, входящие в кристаллическую решетку, а также находящиеся в менее упорядоченном состоянии в стекловидном веществе, имеют определенную подвижность. Она тем меньше, чем прочнее внутрискристаллические связи. Основными источниками электропроводности являются ионы стекловидной фазы, обладающие большей подвижностью по сравнению с ионами кристаллической фазы. Зависимость логарифма удельного электрического сопротивления опытных образцов от температуры обжига при температуре измерения 100°C представлена на рисунке 1.

Подобное изменение электрического сопротивления можно связать с ослаблением химических связей в материалах из-за возрастания тепловых колебаний ионов при повышении температуры. При этом получают дополнительную степень свободы в первую очередь слабосвязанные ионы стеклофазы – щелочные и другие примесные ионы.

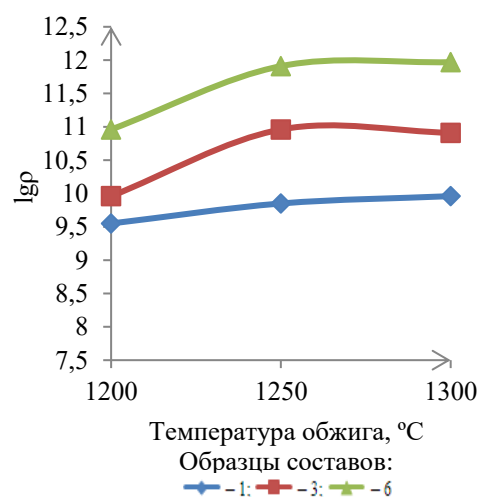


Рисунок 1 – Влияние температуры спекания на логарифм удельного электрического сопротивления образцов

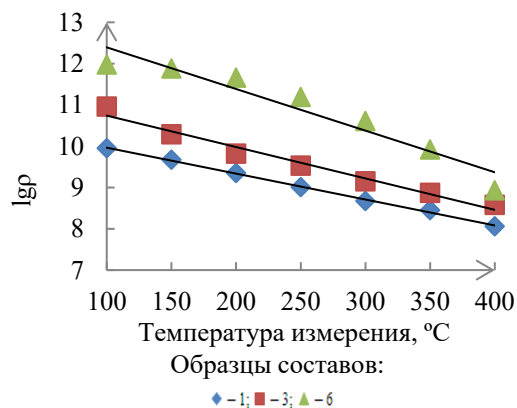


Рисунок 2 – Влияние температуры измерения на логарифм удельного электрического сопротивления образцов, обожженных при температуре 1250 °C

Из-за высокой степени ионной связи ($> 80\%$) по сравнению с ковалентной ($< 20\%$) ионы одновалентных Na^+ и K^+ обладают большой подвижностью. С увеличением температуры обжига подвижность увеличивается и уменьшается электросопротивление. Температурная зависи-

мость логарифма удельного сопротивления образцов, обожженных при температуре 1250 °C, приведена на рисунке 2.

Электросопротивление образцов увеличивается с ростом температуры спекания, т. к. в стекловидной прослойке присутствуют ионы Ba^{2+} . Ионы бария характеризуются высоким ионным радиусом и способны оказывать тормозящее действие на ионы щелочных металлов, чем снижают электропроводность и повышают удельное электросопротивление (имеет место нейтрализационный эффект).

С ростом температуры обжига увеличивается содержание кристаллической фазы, а стекловидная фаза обогащается SiO_2 и Al_2O_3 , которые обладают большей прочностью связи, чем ионы щелочных металлов.

По результатам исследования выбран оптимальный состав образца. Наибольшими значениями электросопротивления характеризуются образцы состава № 6, в составе которых содержится наибольшее количество крупного катиона Ba^{2+} , снижающего подвижность носителей заряда и уменьшающего электропроводность.

УДК 621

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ

Колонтаева Т. В.¹, Сергеевич О. А.²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В результате выполнения исследовательской работы изучены базовые трехкомпонентные системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ и $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ с целью синтеза и изучения свойств и микроструктуры электроизоляционной керамики. Особое внимание уделено изучению основных химических соединений, образующихся в указанных системах, а именно кордиерита и цельзиана. Приведены основные характеристики соединений и их основные свойства. Проведен термодинамический анализ трехкомпонентной диаграммы состояния в области исследуемых составов.

Ключевые слова: электроизоляционная керамика, кордиерит, цельзиан, кристаллическая фаза.

ELECTRICAL MATERIALS BASED ON CRYSTAL PHASE COMPOSITIONS

Kolontaeva T. V.¹, Sergievich O. A.²

¹ Belarusian National Technical University

² Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

Abstract. As a result of the research work, the basic three-component systems $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ and $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ have been studied in order to synthesize and study the properties and microstructure of electrical insulation ceramics. Special attention has been paid to the study of the main chemical compounds formed in these systems, namely cordierite and celziite. The basic characteristics of the compounds and their basic properties have been presented, and a thermodynamic analysis of the three-component state diagram in the region of the studied compositions has been conducted.

Keywords: electrical insulating ceramics, cordierite, celcius, crystalline phase.

Адрес для переписки: Колонтаева Т. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tatkolontaeva@mail.ru

Рациональный выбор керамических электроизоляционных материалов определяется главным образом их свойствами, а также изменением под воздействием электрического напряжения, температуры и других факторов.

Микроструктура, текстура, а также точность размеров керамических деталей являются определяющими при выборе области использования керамического изделия. Прогнозируемыми должны

быть и свойства керамики – в первую очередь, электрофизические и термические свойства

Керамика по структуре представляет собой композицию трех основных фаз: кристаллической (характеризует основные свойства), стекловидной (выполняет функцию связующего вещества и определяет технологические свойства) и газовой (играет положительную роль для пористых материалов и отрицательную для монокристаллических).

Целью работы является обоснование выбора составов для синтеза керамических материалов для производства электроизоляционных изделий на основе системы $\text{MgO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

С этой целью проведен анализ двух базовых трехкомпонентных систем $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ и $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

Трехкомпонентная оксидная система $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, которая представлена на рисунке 1, используется как базовая в производстве электрокерамических материалов с хорошими термическими свойствами. На основе этой системы синтезированы форстеритовая, стеатитовая, кордиеритовая керамика [1].

Наиболее перспективным термостойким материалом, обладающим хорошими электроизоляционными характеристиками является кордиерит ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$).

Химический состав кордиерита, %: $\text{MgO} - 13,7$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 34,9$; $\text{SiO}_2 - 54,1$. При 1540°C он плавится с разложением на муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и магнезиальное стекло.

К классу кордиеритовой керамики относят не только изделия из чистого кордиерита, но и, как правило, изделия на основе кордиерита с различными добавками.

По стойкости к термоударам кордиерит уступает только кварцевому стеклу и некоторым видам литиевой керамики, что связано преимущественно с низким температурным коэффициентом линейного расширения ТКЛР ($1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) кордиерита.

Кордиерит имеет достаточно высокую огнеупорность ($1400-1500^\circ\text{C}$) и устойчив к действию кислот и щелочей (превосходит алюмооксидную керамику, электрофарфор, ультрафарфор и кварцевое стекло). В качестве второй базовой для составления композитной керамики выбрана система $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (рисунок 2). В системе образуется тройное химическое соединение алюмосиликат бария (цельзиан), имеет формулу $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [1]. Алюмосиликат бария имеет высокую температуру плавления -1740°C .

$\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ – конгруэнтное химическое соединение. По структуре имеет моноклинную сингонию. Модификация цельзиана изменяется выше 1600°C и переходит в гексагональную сингонию.

Цельзиановая керамика характеризуется весьма малыми значениями диэлектрических потерь при нормальной и повышенной температуре, средним значением температурного коэффициента диэлектрической проницаемости $(6,5-7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Удельное объемное сопротивление при 20°C имеет значения $10^{15}-10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

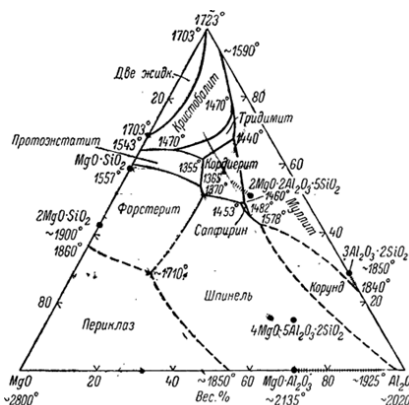


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

При синтезе цельзиановой керамики алюмосиликат взаимодействует с оксидом бария и образуется цельзиан, кристаллическая фаза, необходимая для синтеза композитной керамики. Керамика на основе $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ характеризуется малыми диэлектрическими потерями и электронной проводимостью.

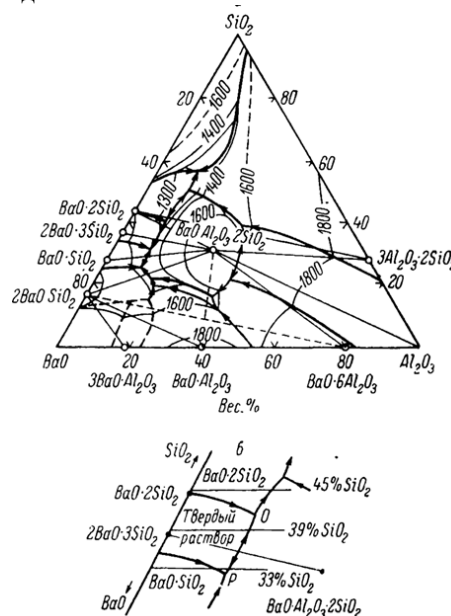


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Сочетание различных кристаллических фаз, в частности кордиерита и цельзиана, позволит создать наилучший комплекс электрофизических свойств материала. Так, для получения материалов с улучшенными электрофизическими свойствами катион Mg^{2+} целесообразно заменить катионом Ba^{2+} . Это приведет к увеличению удельного объемного сопротивления материалов, так как вводимый ион Ba^{2+} имеет большой ионный ра-

диус и обеспечивает снижение электропроводности за счет создания препятствий при перемещении носителей зарядов.

Комбинирование различных структур в одном материале является перспективным научным направлением в приборостроении и обеспечивает

получение новых материалов с уникальным сочетанием свойств.

Литература

1. Торопов, Н. А. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск 3 / Н. А. Торопов. – Л.: Наука. Ленингр. отд., 1969. – 372 с..

УДК 681

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ С УЧЕТОМ ИНЖЕКЦИОННОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ГЛУБОКИХ ПРИМЕСЕЙ

Колядко Я. А., Шадурская Л. И., Гусев О. К., Воробей Р. И., Свистун А. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено моделирование коэффициента амбиполярной диффузии с учетом инжекционной перезарядки глубоких центров, а также рассчитаны диффузионные длины электронов и дырок при произвольной концентрации дефектов и уровне возбуждения.

Ключевые слова: амбиполярная диффузия, инжекционная перезарядка.

MODELING OF AMBIPOLAR DIFFUSION PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT INJECTION RECHARGE OF DEEP IMPURITIES

Kolyadko Y. A., Shadurskaya L. I., Gusev O. K., Vorobey R. I., Svistun A. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The ambipolar diffusion coefficient is modeled taking into account the injection recharge of deep centers, and the diffusion lengths of electrons and holes are calculated at an arbitrary defect concentration and excitation level.

Keywords: ambipolar diffusion, injection recharge.

Адрес для переписки: Колядко Я. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: yakolyadko@yandex.ru

Рассмотрение процессов амбиполярной диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда в полупроводниках традиционно проводится в предположении, что число неравновесных электронов и дырок равно и можно пренебречь процессами, связанными с инжекционной перезарядкой рекомбинационных центров. При этом коэффициент амбиполярной диффузии D является постоянной величиной не зависящей от уровня инжекции. Однако, процесс инжекционной перезарядки дефектов с глубокими уровнями может существенно влиять как на время жизни неравновесных носителей заряда, так и на коэффициент амбиполярной диффузии.

Цель настоящей работы – моделирование коэффициента амбиполярной диффузии с учетом инжекционной перезарядки простых однозарядных дефектов с глубокими уровнями, а также расчет диффузионной длины электронов и дырок, в предположении, что полупроводник n -типа и концентрация дефектов, и уровень возбуждения произвольны.

Система уравнений, описывающая процессы диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда в условиях оптической перезарядки центров, имеет вид:

$$\begin{aligned} j_n &= en\mu_n E + d_n \nabla n, \\ j_p &= ep\mu_p E + d_p \nabla p, \\ \Delta p &= \Delta n + N(f - f_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где j_n, j_p – полный ток электронов и дырок соответственно; n, p – концентрация свободных электронов и дырок; D_p, D_n – коэффициент диффузии электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижность электронов и дырок; E – амбиполярное поле диффузии; $\Delta p, \Delta n$ – неравновесные концентрации e и p в v - и c - зонах соответственно; f_0 – равновесная функция заполнения центров электронами; f – неравновесная функция заполнения центров электронами [1].

Решение (1) относительно E с учетом аналитического выражения f дает выражение для амбиполярного коэффициента диффузии [1].

$$D = D_n + \mu_n(n_0 + \Delta n) \frac{A+B(\frac{k^2 \Delta n + M}{(c+w)^{1/2}} - K)}{\mu_p(\Delta n \alpha + (c+w)^{1/2}) + S}, \quad (2)$$

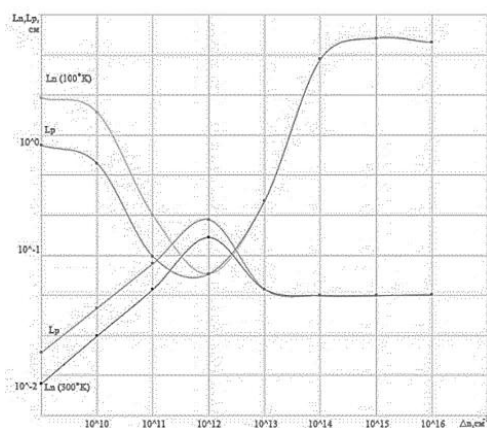
где A, B, K, M, α, w, S – параметры модели рекомбинации и амбиполярной диффузии, определяемые видом глубоких центров и полупроводника.

Причем при низких уровнях возбуждения и небольших концентрациях простых дефектов ($p, n \ll N$), когда можно пренебречь захватами носителей зарядов на центры стремится к выражению для коэффициента амбиполярной диффузии статистики Холла-Шокли-Рида[2].

$$D = \frac{\sigma_p D_n + \sigma_n D_p}{\sigma_n}. \quad (3)$$

С помощью разработанной модели проводились численные расчеты зависимости диффузионной длины электронов и дырок (L_n и L_p), времени жизни (τ_n , τ_p) от уровня возбуждения. Варьировались параметры дефектов и энергия активации центров при $T = 100$ К и $T = 300$ К.

На рисунке 1 представлена зависимость дифференциальной длины L_n и L_p от Δn .



$$n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}, \gamma_n = 10^{-8} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}, \gamma_p = 10^{-6} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1} \\ N = 10^{14} \text{ см}^{-3}, E = E_c - 0,2 \text{ эВ}$$

Рисунок 1 – Зависимость L_n , L_p от концентрации неравновесных носителей заряда в Ge p-типа

На рисунке 2 приведены зависимости D от Δn .

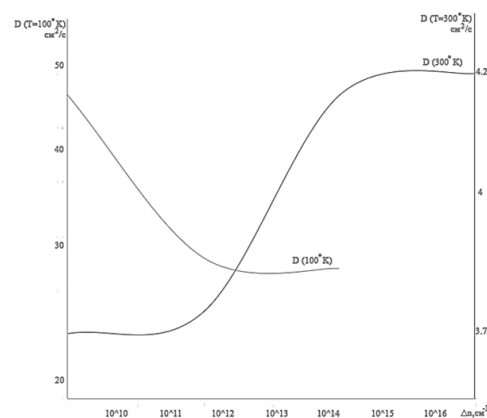
Видно, что D является постоянным только в частных случаях низкого и высокого уровня возбуждения, когда неравновесная функция распределения электронов на центре стремится к равновесному значению f_0 (при низком уровне возбуждения).

$$f \rightarrow f_0 \approx \frac{n_0}{n_0 + n_1}. \quad (4)$$

И при высоком уровне возбуждения, когда f определяется асимметрией сечения захвата.

$$f \rightarrow \frac{\gamma_n}{\gamma_n + \gamma_p}. \quad (5)$$

Кроме того, диффузионные длины основных и неосновных носителей заряда, существенно различные при низком уровне возбуждения с ростом уровня инжекции проходят через экстремумы и совпадают при больших Δn .



$$n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}, \gamma_n = 10^{-8} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}, \gamma_p = 10^{-6} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$$

$$N = 10^{14} \text{ см}^{-3}, E = E_c - 0,2 \text{ эВ}$$

Рисунок 2 – Зависимость D от концентрации неравновесных носителей заряда в Ge p-типа

Проведенное моделирование коэффициента амбиполярной диффузии и диффузионной длины электронов и дырок можно использовать при расчете энергетических характеристик фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей с глубокими уровнями примесей.

Литература

1. Ткачев, В. Д. Исследование диффузии фосфора в кремнии / В. Д. Ткачев, Л. И. Шадурская, В. Ю. Явид // Физика и техника п/п. – 1979. – Т. 13, № 1. – С. 71–74.
2. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М.: Энергия, 1976. – 265 с
3. Ткачев, В. Д. Влияние температуры на электропроводность эпитаксиальных пленок арсенида галлия / В. Д. Ткачев, Л. И. Шадурская, В. Ю. Явид // Физика и техника п/п. – 1980. – № 11. – С. 2214–2217.

УДК 620.179

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУГУНА

Крень А. П.¹, Никифоров А. В.², Турсунов Н. К.³, Уразбаев Т. Т.³,
Мацулевич О. В.¹ Протасеня Т. А.¹, Баев А. Р.¹, Бурнос А. Ю.¹

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь,

³Ташкентский государственный транспортный университет

Ташкент, Узбекистан

Аннотация Показаны пути повышения достоверности контроля механических характеристик чугуна с учетом его микроструктуры. Установлено, что совместное применение ультразвукового контроля и динамического индентирования позволяет определить не только твердость, модуль упругости, предел прочности, но и установить вид чугуна: высокопрочный, серый, с вермикулярным графитом или белый.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, чугун, структура, микроударное индентирование.

INCREASING THE RELIABILITY OF CONTROL OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CAST IRON

Kren A. P.¹, Nikiforov A. V.², Tursunov N. K.³, Urazbaev T. T.³,
Matsulevich O. V.¹, Pratasenia T. A.¹, Baev A. R.¹, Burnos A. Y.¹

¹Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

²Belarusian State University

Minsk, Belarus

³Tashkent State University of Transport

Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Ways to improve the reliability of cast iron mechanical testing, taking into account its microstructure, are demonstrated. It has been established that the combined use of ultrasonic testing and dynamic indentation allows to determine only hardness, elastic modulus, and tensile strength, but also the type of cast iron: high-strength, grey, with vermicular graphite, or white.

Keywords: hardness, elastic modulus, cast iron, structure, micro-impact indentation.

Адрес для переписки: Крень А. П., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: alekspk@iapb.bas-net.by

Чугунные компоненты широко используются при производстве котлов, сосудов эксплуатирующихся под давлением, трубопроводов, в автомобилях, тракторах, станках и общем машиностроении. Для повышения эффективности и безопасности компоненты из чугуна проходят испытания с помощью методов неразрушающего контроля. По мере накопления опыта и проведения отдельных исследований [1] стало очевидно, что наиболее перспективным методом с точки зрения автоматизации процесса остается ультразвуковой. Он показывает высокую эффективность при сохранении низких временных и финансовых затрат на одно испытание.

В то же время этот метод контроля используется в большинстве случаев только для определения степени шаровидности графита, то есть для разграничения серого и высокопрочного чугуна, без определения его механических характеристик. Неразрушающий контроль шаровидности можно проводить с помощью любого ультразвукового прибора; способного измерять скорость звука, включая толщиномеры, дефектоскопы и приемники импульсов. Для специализированного измерения скорости могут использоваться прецизионные толщиномеры, которые обеспечивают прямое измерение скорости звука в чугуне и других материалах на основе введенной калибровки толщины. Погрешность измерения скорости обычно составляет порядка одной десятой процента.

Существует устойчивая разница в скорости звука между чистым железом, чугуном с шаровидным графитом и серым чугуном. Обычно скорость звука в чистом железе составляет около 5,9 мм/мкс, в чугуне с шаровидным графитом – 5,6 мм/мкс, а в сером чугуне – 4,8 мм/мкс. Точные значения скорости звука варьируются в зависимости от состава сплава, структуры зерна и других технологических параметров. Поэтому всегда необходимо использовать настроечные образцы из испытуемого материала. Опубликованные исследования [2] показывают, что зависимость между скоростью звука и процентом шаровидно-

сти нелинейная. Однако при этом имеется существенная разница в скорости звука между двумя идентичными отливками, содержащими одинаковое процентное содержание графита: одна с графитом в пластинчатой форме (серый чугун), а другая с шаровидным графитом (чугун с шаровидным графитом). Недостатками контроля является необходимость точного определения толщины испытуемого образца. Обычно ультразвуковой контроль на предмет шаровидности проводят в тех точках отливки, где толщина может быть измерена механически с помощью микрометра или штангенциркуля. Точное измерение скорости звука невозможно, если толщина в контрольной точке неизвестна.

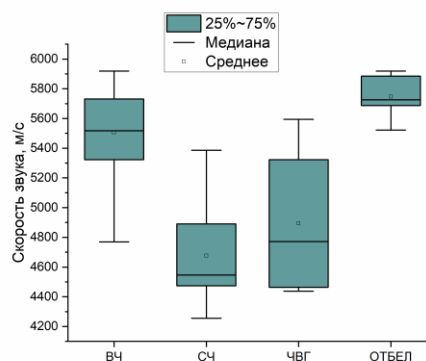


Рисунок 1 – Изменение скорости звука в чугунах различного вида

Другим примером возможных проблем применения ультразвукового метода является наличие включений серого чугуна в отливках из чугуна с шаровидным графитом. Скорость звука в сером чугуне ниже, чем в чугуне с шаровидным графитом, поэтому время прохождения импульса через отливку, содержащую включения из серого чугуна, больше, чем через отливку, полностью изготовленную из чугуна с шаровидным графитом. Измеренная скорость звука также ниже. Однако, локальное снижение скорости звука в отливке из

чугуна с шаровидным графитом, как правило, является признаком потенциальной проблемы.

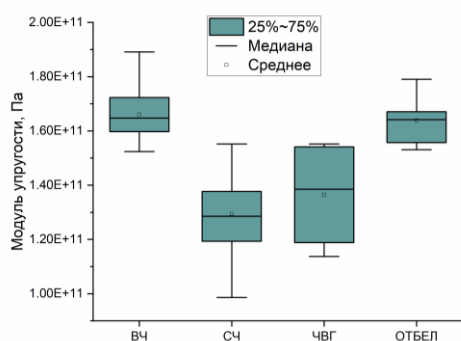


Рисунок 2 – Изменение модуля упругости, измеренного динамическим индентированием

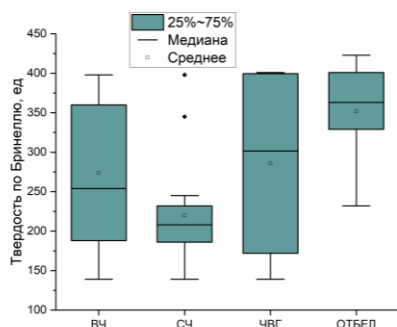


Рисунок 3 – Изменение твердости по Бринеллю по данным динамического индентирования

Проведенные нами исследования показали, что с учетом развития автоматизации и возможностей,

возникающих благодаря развитию технологий искусственного интеллекта, ультразвуковой контроль может быть дополнен или заменен на динамическое индентирование [3], позволяющее быстро и эффективно провести контроль ряда механических характеристик: динамическую твердость, твердость по Бринеллю, модуль упругости, предел прочности и пластичность. На рисунках 1-3 показаны диапазоны изменения характеристик, анализ полученных данных, а также данные металлографического контроля, позволили разработать алгоритм определения механических свойств в привязке к микроструктуре образцов

Показано, что результаты измерений методом динамического индентирования, дополненные результатами ультразвукового контроля, позволяют разделить не только СЧ и ВЧ чугуны, но и определить чугун с вермикулярным графитом, а также отбел.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ. Проект T23УЗБ-035.

Литература

1. Jones, M. W. Ranking of Non-Destructive Testing Methods for Ductile Iron Castings for Industry 4.0 / M. W. Jones. – Electronic Theses and Dissertations. – 2025. – № 2943. – 145 p.
2. Metals Handbook: in 20 vol. / ASM International. – 9th ed. – Metals Park, Ohio: ASM International, 1989. – Vol. 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control. – P. 531–535.
3. Rudnitsky, V. A. Determining yield strength of metals by microindentation with a spherical tip / V. A. Rudnitsky, A. P. Kren, G. A. Lantsman // Russian Journal of Non-destructive Testing. – 2019. – Vol. 55. – P. 162–168.

УДК 621.38

ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕИСПРАВНОСТЯМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Кудина А. В.¹, Франко Е. П.¹, Габец В. Л.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Не существует такой техники, которая обладала бы абсолютной надежностью. Всегда будут иметь место различные дефекты и неисправности. Для их ремонта необходимо правильно обнаруживать поломку. Рассмотрены основные причины появления неисправностей, а также способы их диагностики.

Ключевые слова: электронные устройства, неисправности, воздействующие факторы, диагностика.

BASICS OF PROCESSES LEADING TO MALFUNCTIONS OF ELECTRONIC DEVICES

Kudina A. V.¹, Franco E. P.¹, Gabets V. L.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. There is no equipment that possesses absolute reliability. There will always be various defects and malfunctions. To repair them, it is essential to correctly identify the problem. This work examines the main principles of malfunction detection, as well as methods for their diagnosis.

Keywords: electronic devices, malfunctions, influencing factors, diagnostics.

Адрес для переписки: Кудина А. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск., 22013, Республика Беларусь
e-mail: a.kudina@bsuir.by

Введение. В данной работе рассмотрены процессы и факторы, приводящие к неисправностям

электронной аппаратуры. Главная причина неисправностей – эксплуатация электроники при

условиях, не соответствующих указанным в нормативно-технической документации [1].

Неисправности могут быть временными, т. е. проявляться при определенных условиях внешней среды, так и постоянными в случае появления необратимых изменений.

Выделяют несколько основных воздействующих факторов:

- механические повреждения;
- тепловое воздействие;
- электрическое воздействие;
- химическое воздействие;
- биологическое воздействие.

Механические повреждения. Механические воздействия классифицируют следующим образом:

- вибрации;
- удары;
- линейные нагрузки.

Вибрации могут приводить к усталости материала печатной платы устройства, ударные нагрузки и линейные ускорения могут разрушать электронные компоненты или вызывать их отсоединение от платы. Механические повреждения могут возникать при эксплуатации различных групп электронной аппаратуры, преимущественно возимой, носимой, бортовой и др., а также при транспортировке в том числе и стационарной аппаратуры.

Можно значительно сократить воздействие механических факторов на электронное устройство еще на этапе проектирования. Для противодействия вибрациям используют платы с вибропоглощающими покрытиями и такие конструктивные элементы, как виброизоляторы и демпфирующие компаунды. Дополнительно для повышения стойкости к механическим нагрузкам при проектировании корпусов электронной техники используют такие решения, как дополнительные точки крепления, ребра жесткости, отбортовки и профилирование [2].

Диагностирование механических повреждений обычно не представляет труда, т. к. часто достаточно внешнего и внутреннего осмотра устройства и проверки целостности проводников мультиметром (т. н. «прозвонка»).

Тепловые воздействия. Воздействие температуры на электронные устройства оказывает значительное влияние на их работу. Причем негативно сказаться на работоспособности может и повышенная, и пониженная температура. Основными причинами воздействия температур на приборы являются климатические факторы (температура окружающей среды и солнечная радиация) и собственный нагрев электронного устройства при эксплуатации.

Повышенная температура может приводить к уменьшению электропроводности проводников и изменению вольтамперных характеристик таких полупроводниковых приборов, как транзисторы и диоды. Из-за этого может нарушиться работа устройства. Также при повышенной температуре снижается сопротивление полупроводников, что

вызывает увеличение тока, а значит и выделяемой тепловой мощности. Низкие температуры влияют на диэлектрические свойства материалов из-за конденсации влаги. Многие материалы становятся хрупкими при низкой температуре, что становится причиной механических поломок разрушения паяных соединений.

Как правило, тепловые воздействия являются периодическими. Постоянные перепады температур могут быть причиной возникновения механических напряжений [3]. Печатные проводники и разные соединения также чувствительны к регулярным изменениям температур ввиду различия тепловых коэффициентов материалов проводников, печатных плат, припоев, клеев.

Для снижения воздействия температур увеличивают толщину проводников, используют термоизоляцию и различные элементы пассивного или активного охлаждения.

Для обнаружения повреждений, вызванных воздействием тепла, производят измерение температуры с помощью тепловизора или встроенных в электронный прибор датчиков. Электрические воздействия. Электрический ток, являющийся основой работы электронных устройств, также может быть причиной неисправностей.

Различные чувствительные компоненты, например микросхемы и транзисторы, выходят из строя при воздействии большого тока. Большой ток также вызывает перегрев многих элементов. Частой причиной поломок электронных приборов является короткое замыкание, происходящее при случайном замыкании двух проводников при попадании воды или пыли. Статическое электричество, накапливающееся на устройствах, вызывает разряды, повреждающие электронные компоненты. К электрическим воздействиям можно отнести и электромагнитные помехи, из-за которых могут возникать сбои в передаче сигналов. Среди других причин неисправностей можно выделить скачки напряжения в цепях питания, пробой диэлектрических материалов и неправильная полярность подключения питания.

Для защиты от электрических воздействий на этапе проектирования используют материалы печатных плат с высокими диэлектрическими свойствами, увеличивают расстояния между проводниками, применяют предохранители, стабилизаторы питания и изоляцию от пыли и влаги.

Для обнаружения неисправностей, вызванных электрическими факторами, применяют множество методов диагностики: измерение температур компонентов, проверка с использованием сложного оборудования: тестеров, осциллографов и мультиметров.

Химические воздействия. Окружающая среда может оказывать значительное влияние на работоспособность устройства. Содержащиеся в среде вещества (в первую очередь влага) могут вызывать коррозию металлических проводников. Изоляция и защитные покрытия могут повреждаться при контакте с кислотами или щелочами.

Некоторые материалы при длительном воздействии ультрафиолета подвергаются разложению.

Основным способом защиты от химических воздействий является использование защитных покрытий. Также для предотвращения попадания воды и агрессивных веществ внутрь устройства применяется герметизация.

Биологические воздействия. Биологические факторы воздействия на технику являются довольно специфичными, поскольку возникают редко и представляют собой попадание живых организмов в устройство. Самым частым случаем такого типа неисправностей является появление плесневых грибов, приводящих к замыканиям, разрушению покрытий и коррозии. Для избежания подобной неисправности необходимо следить за условиями эксплуатации электронных приборов, не допускать попадания внутрь влаги и грязи и регулярно производить очистку.

Выводы. В работе изучены основные причины появления неисправностей в электронных

устройствах и приведены способы диагностики этих неисправностей [4]. Можно сделать вывод, что существует множество факторов, воздействующих на электронную аппаратуру, и в связи с очень стремительным развитием электроники необходимо учитывать весомость всех факторов и оценивать их вклад при защите от внешних воздействий.

Литература

1. Классификация неисправностей [сайт]. – URL: <https://helpiks.org/8-95905.html> (дата обращения: 02.09.2025).
2. Радиоэлектронная аппаратура и основы ее проектирования / Н. И. Каленкович [и др.]. – Мн.: БГУИР, 2008. – 200 с.
3. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства: учебник / Ф. А. Ткаченко. – М.: ИНФРА-М: Новое знание, 2011. – 682 с.
4. Никитин, Л. Н. Испытания, контроль и диагностика приборов и электронных средств / Л. Н. Никитин, А. Н. Лукин, В. Н. Семенов. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 243 с.

УДК 620.179.14

СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ 12ХН3А

Кулагин В. Н., Бурак В. А., Осипов А. А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрена возможность многопараметрового контроля стали 12ХН3А с использованием магнитных параметров. Даны рекомендации по увеличению надежности определения контролируемых величин, а также повышению надежности выпускаемой продукции.

Ключевые слова: магнитный метод, неразрушающий контроль, точность измерения магнитных характеристик

CREATING STABLE MULTI-PARAMETER MODELS USING 12ХН3А STEEL

Kulagin V. N., Burak V. A., Osipov A. A.

The State Scientific Institution

“Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus

Abstract. The possibility of multi-parameter testing of 12ХН3А steel using magnetic parameters is considered. Recommendations for increasing the reliability of determining the controlled quantities, as well as improving the reliability of manufactured products, are provided.

Keywords: magnetic method, non-destructive testing, magnetic characteristic measurement accuracy.

Адрес для переписки: Осипов А. А., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: osipov@iaph.bas-net.by

Контроль сталей с неоднозначной зависимостью является одной из трудных проблем методов неразрушающего контроля (НК) при их внедрении в производственный процесс предприятий. Для решения проблемы возможно использование многопараметрового метода контроля [1, 2].

При создании моделей использовались линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j, \quad (1)$$

где b_j – коэффициенты многопараметровой модели, y – зависимые переменные, x_j – независимые переменные.

Для большей объективности результатов воспользуемся данными, которые известны из литературы [3, 4]. В [3] приводятся данные для стали 12ХН3А при температуре закалки $T_{\text{зак}} = 860^\circ\text{C}$ по четырем измеренным магнитным параметрам: коэрцитивной силе H_c ; релаксационной намагниченности M_{H_r} ; начальной магнитной восприимчивости χ_n и намагниченности насыщения M_s . Модели по [3] можно построить для температуры отпуска $T_{\text{отп}}$ и твердости HRC . Интервал изменения температур от 250 до 750 °C и твердости от 17 до 37 HRC.

На рисунке 1 представлена зависимость начальной магнитной восприимчивости χ_n от температуры отпуска $T_{\text{отп}}$. (аналогичные зависимости

приводятся в [3] и для других трех магнитных параметров), поэтому необходимо привлечение нескольких параметров.

На рисунке 2 представлена зависимость температуры отпуска вычисленной $T_{\text{отп. выч}}$ от температуры отпуска измеренной $T_{\text{отп. изм}}$ для модели из четырех параметров (H_c , M_{H_r} , χ_n , M_s).

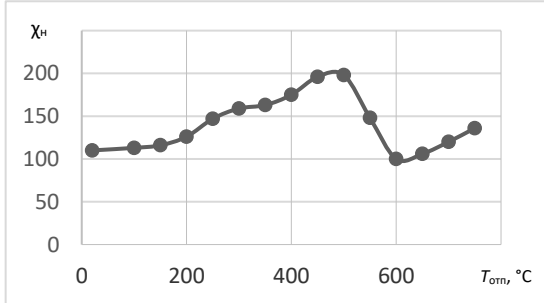


Рисунок 1 – Зависимость начальной магнитной восприимчивости χ_n от температуры отпуска $T_{\text{отп}}$ [3]

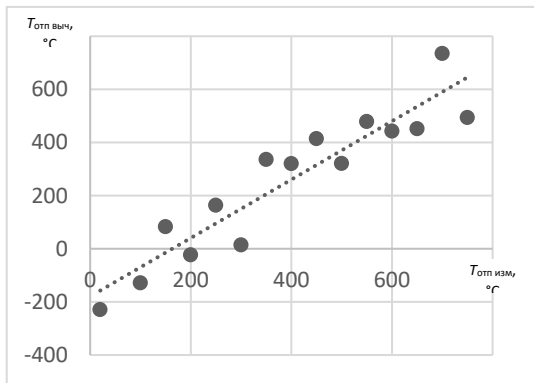


Рисунок 2 – Зависимость температуры отпуска вычисленной $T_{\text{отп. выч}}$ от измеренной $T_{\text{отп. изм}}$

Из рисунка 2 видно, что вычисленные значения температуры отпуска $T_{\text{отп. выч}}$ могут быть отрицательными (при вычислениях в модель из четырех параметров вводилась случайная ошибка 1 %) [1, 2, 5], коэффициент множественной корреляции $R = 0,9478$, приведенная погрешность $\gamma = ((1 - R^2)/3)^{1/2} = 18,4\%$ (т. к. $R > 0,9$) [4–6]. Для увеличения точности вычисленных параметров создают более сложные модели, например, из 8-ми параметров, причем для увеличения стабильности модели при ее формировании вводят погрешность (в данном случае 1 %)

$$T_{\text{отп. выч}} = 2848 + 32271/(H_c \cdot H_c) - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot M_s \cdot M_s + (2) \\ 4,92 \cdot 10^9/(M_s \cdot M_s) - 0,0571 \cdot M_{H_r} \cdot H_c - 6,235 \cdot M_s / H_c - \\ 6046 \cdot M_{H_r} - 0,540 \cdot M_s + 1,484 \cdot 10^6 / M_s.$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,9825$, а приведенная погрешность $\gamma = ((1 - R^2)/3)^{1/2} = 10,8\%$. Однако, более объективно анализировать модели не только по величине приведенной погрешности, а и по

коэффициенту чувствительности к погрешности параметров [1, 2]

$$\delta y = \sum_{j=1}^p (b_j x_j / y) \delta_j = \sum_{i=1}^p K_i \delta_i, \quad (3)$$

где K_j – коэффициенты значимости мультипликативных ошибок δ_j независимых переменных.

Тогда для модели (2) получаем

$$\delta y = 4,38 + 2,45/(H_c \cdot H_c) - 2,787 \cdot M_s \cdot M_s + \\ 2,717/(M_s \cdot M_s) - 0,186 \cdot M_{H_r} \cdot H_c - 3,558 \cdot M_s / H_c - \\ 2,067 \cdot M_{H_r} - 1,386 \cdot M_s + 1,368 / M_s.$$

В (3) средний по модулю коэффициент $K \sim 2$ как при восьми параметрах, так и при семи. В случае, если модель создавали без введения погрешности, то в обоих случаях средний по модулю коэффициент находится на уровне десятков тысяч. На рисунке 3 приводится модель из семи параметров (без введения в нее погрешности).

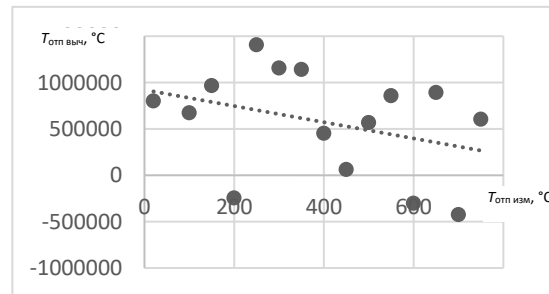


Рисунок 3 – Зависимость температуры отпуска вычисленной $T_{\text{отп. выч}}$ от измеренной $T_{\text{отп. изм}}$ для модели из семи параметров без введения в нее погрешности

В данном случае (рисунок 3) зависимость имеет обратный ход (рисунок 2), но есть варианты, в которых зависимость практически отсутствует (при вычислениях по модели в каждый ее параметр вводилась случайная ошибка 1 %).

Необходимо также отметить, что при формировании моделей без введения в них погрешности результаты получаются существенно разными при переходе от семи параметров к восьми, поскольку коэффициент множественной корреляции R изменяется от 0,996 до 0,713, а величина приведенной погрешности γ возрастает от 5 % до 35 %. При этом данные изменения для модели с восемью параметрами не происходят при введении в нее погрешности приблизительно $6 \cdot 10^{-12}\%$ и связаны с появлением в модели (2) последнего слагаемого.

Расчеты по формулам для коэффициентов множественной корреляции R^2 (3.37) и (3.38) из [7] приводят к отрицательным результатам (приблизительно –25 и –59, соответственно), что является еще одним аргументом для того, чтобы вводить погрешность в модель при ее формировании. При замене последнего слагаемого на H_c , M_s или χ_n падение коэффициента множественной корреляции R не

наблюдается (по порядку величины – это погрешность расчета).

На основании проведенных вычислений, необходимо рекомендовать выполнять значительно более точное измерение независимых параметров, поскольку только для коэрцитивной силы H_c в модели (2) имеет место существенная внутренняя компенсация погрешности измерения параметра K с ~ 6 до значения около 1 [5].

Литература

1. Осипов, А. А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78–84.
2. Осипов, А. А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87–93.

3. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.

4. Кулагин, В. Н. Оценка надежности и выбор многопараметровой модели при использовании магнитного контроля для стали 12ХН3А / В. Н. Кулагин, В. А. Бурак, А. А. Осипов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы конференции, Могилев, 24–25 апреля 2025 г.; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 288–289.

5. Оценка регрессионных многопараметровых моделей в задачах магнитного неразрушающего контроля / А. А. Осипов, В. А. Бурак, З. М. Короткевич, А. С. Счастный // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 4. – С. 32–44.

6. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

7. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 240 с.

УДК 621.317.799: 621.3.049.77

ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Лисенков Б. Н., Сидорик О. В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

Аннотация. Представлен метод формирования прямоугольных импульсов напряжения большой мощности за счет разряда накопительного конденсатора.

Ключевые слова: контроль силовых диодов, транзисторов, измерение ВАХ.

FORMATION OF POWERFUL RECTANGULAR VOLTAGE PULSES

Lisenkov B. N., Sidorik O. V.

MNIPI Open Joint-Stock Company, Minsk, Belarus

Abstract. A method for generating high-power rectangular voltage pulses by discharging a storage capacitor is presented.

Keywords: power diode and transistor testing, I-V characteristic measurement.

Адрес для переписки: «МНИПИ» Лисенков Б. Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Сфера приборостроения охватывает производство и контроль изделий опто- и микроэлектроники. Контроль силовых компонентов требует применения мощных импульсных сигналов большой скважности, чтобы избежать повышения температуры объекта подверженного испытаниям (ОПИ), который, как правило, обладает малой теплоемкостью.

Для повышения достоверности контроля статических параметров ОПИ желательно использовать испытательные импульсы прямоугольной формы и проводить контроль интересующего параметра при установившемся значении вершины испытательного сигнала.

В работе рассматривается метод формирования прямоугольных (трапецеидальных) импульсов напряжения с плоской вершиной большой мощности, например, $5 \div 10$ кВт, и прецизионной амплитуды предназначенных для регистрации вольтамперных характеристик (ВАХ) силовых диодов и транзисторов.

Как правило, мощные импульсы напряжения формируют путем разряда накопительного

конденсатора через ОПИ с помощью электронного ключа, способного выдерживать требуемое напряжение и большой ток, при этом формируемые остrokонечные импульсы не обеспечивают высокой точности измерений из-за возникающей динамической погрешности.

Предлагаемый метод основан на формировании мощных импульсов напряжения с помощью быстродействующего и высоковольтного операционного усилителя (ОУ), охваченного цепью отрицательной обратной связи, выходной каскад которого выполнен на силовоточном МОП транзисторе, как показано на рисунке 1.

С помощью блока управления задают амплитуду и длительность входного импульса. Блок формирования преобразует цифровой код амплитуды, поступающий с блока управления, в уровень напряжения. Кроме того, блок формирует импульсы на входе ОУ путем переключения его входа между уровнем напряжения и нулевым уровнем (земля). Длительность импульсов определяется сигналом с блока управления.

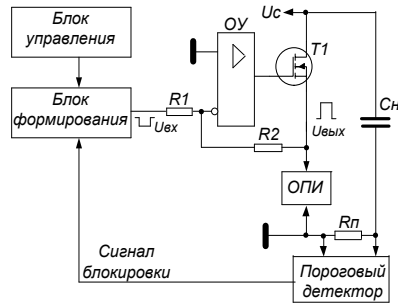


Рисунок 1 – Схема формирователя импульсов

$U_{вх}$ – импульс напряжения на входе ОУ, $U_{вых}$ – импульс напряжения на выходе ОУ, C_n – накопительный конденсатор емкостью 4700 мкФ, ОПИ – объект подверженный испытаниям, R_n – резистор задающий предел максимально возможного тока.

ОУ инвертирует импульс, полученный на выходе блока преобразования, и усиливает его по амплитуде в 10 раз ($R_2/R_1=10$), поэтому выходной диапазон формирователя импульсов от 0 до 50 В, а блока формирования – 0÷5 В.

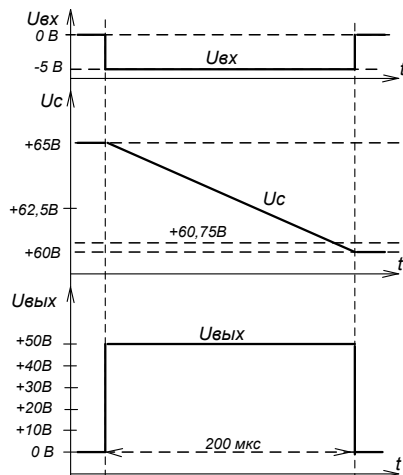


Рисунок 2 – Временные диаграммы работы формирователя мощных импульсов напряжения
 $U_{вх}$ – входной импульс, $U_{вых}$ – выходной импульс,
 U_c – напряжение на конденсаторе

Благодаря обратной связи амплитуда вершины импульса не изменяется в течение его длительности, несмотря на снижение напряжения на стоке транзистора Т1 из-за разряда конденсатора C_n , как показано на рисунке 2.

Для формирования импульсов с плоской вершиной согласно предлагаемому методу, необходимо, чтобы напряжение на накопительном конденсаторе C_n и на стоке транзистора Т1, показанных на рисунке 1, превышало амплитуду плоской вершины импульса напряжения на ОПИ (исток Т1). Как показывает практика, достаточно превышения в 10 В.

Согласно расчетам, напряжение на накопительном конденсаторе C_n емкостью 4700 мкФ, при разряде его постоянным током $I = 100$ А в течение импульса длительностью 200 мкс снизится на 4,25 В.

При величине начального напряжения на конденсаторе C_n равном 65 В, после разряда его током 100 А в течение 200 мкс напряжение на нем в стоке транзистора Т1 будет равно 60,75 В и будет на 10,75 В превышать напряжение на истоке Т1 при формировании импульса амплитудой 50 В, как показано на рисунке 2.

Для формирования сигнала в диапазоне ± 50 В, в качестве высоковольтного ОУ можно выбрать быстродействующий усилитель РА340 фирмы Арех, диапазон питания: ± 175 В.

В качестве силовоточного МОП транзистора Т1 нами выбран IXFN180N20 в корпусе SOT-227В, который допускает работу с импульсами тока силой до 720 А, при максимальном значении постоянного тока 180 А.

Важной особенностью предложенного метода является возможность его применения для измерения ВАХ силовых транзисторов. При этом формирователь, показанный на рисунке 1, используется для формирования на коллекторе (стоке) ОПИ постоянного напряжения, а импульс, открывающий ОПИ, подают на его базу (затвор). Максимальная сила тока через тестируемый транзистор в течение максимальной длительности открывающего импульса на его базе (затворе) остаются прежними – 100 А в течение 200 мкс (или 200 А в течение 100 мкс).

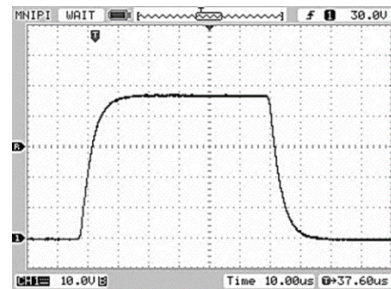


Рисунок 3 – Осциллограмма сформированного импульса напряжения. Коэффициент отклонения осциллографа равен 10 В/дел, коэффициент развертки – 10 нс/дел

Схема, реализующая предложенный метод формирования импульсов напряжения, предусматривает возможность ограничения выходного тока при превышении допустимого уровня.

Для этого в цепь обратной передачи тока конденсатора C_n включен резистор R_n , падение напряжения на котором контролируют с помощью порогового детектора, рисунок 1. При $R_n = 0,005$ Ом ток 220 А создаст на нем падение напряжения 1,1 В и пороговый детектор заблокирует сигнал блока формирования.

Метод формирования мощных импульсов напряжения реализован в «Анализаторе вольт-амперных характеристик силовых полупроводниковых приборов», который разработан и изготовлен как единичный образец в рамках ГНТП «Эталонные и научные приборы» [1].

Для иллюстрации метода, на рисунке 3 представлена осциллограмма импульса амплитудой

47,5 В, формируемого анализатором при длительности импульса 50 мкс на нагрузке 0,5 Ом, ток через нагрузку составляет 93 А.

Анализатор используется для радиационных исследований силовых компонентов в ЦКП «Радиационный центр» при ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Литература

1. Лисенков, Б. Н. Анализатор вольтамперных характеристик силовых полупроводниковых приборов / Б. Н. Лисенков, Н. В. Грицев, А. А. Бруек // Материалы 7-й международной научно-технической конференции «Приборостроение 2014», Минск, 2014 г. / БНТУ. – Мн.: БНТУ, 2014. – С. 90–92.

УДК 681.382

ШУМОВЫЕ ДИОДЫ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

Латий О. О.¹, Буслюк В. В.², Дереченник С. С.², Емельянов В. А.³,
Кочергина О. В.⁴, Оджаев В. Б.⁵, Просолович В. С.⁵, Янковский Ю. Н.⁵, Черный В. В.⁶

¹ОАО «Цветотрон»

²УО «Брестский государственный технический университет»

Брест, Беларусь

³ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

⁴УО «Белорусская государственная академия связи»

⁵Белорусский государственный университет

⁶Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики диодов-генераторов шума и проведено моделирование структуры, состоящей из диода-генератора шума, включенного в обратном направлении, и компенсирующего диода, включенного в прямом направлении. Установлено, что зависимость напряжения микроплазменного пробоя для данных шумовых диодов от температуры в диапазоне 24–125 °С имеет характер близкий к линейному. Это позволяет произвести температурную компенсацию напряжения пробоя шумового диода, последовательно соединив его с прямо включенным диодом Шоттки. Показано, что степень термокомпенсации, характеризующаяся величиной углового коэффициента линейной аппроксимации зависимости напряжения пробоя от температуры, зависит от электрофизических параметров диода-генератора шума и компенсирующего диода.

Ключевые слова: диоды-генераторы шума, температурная компенсация, напряжение пробоя, спектральная плотность напряжения шума, граничная частота шума, диапазон рабочих температур.

NOISE DIODES WITH TEMPERATURE COMPENSATION OF ELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE

Latiy O. O.¹, Buslyuk V. V.², Derechennik S. S.², Yemelyanov V. A.³, Kochergina O. V.⁴,
Odzaev V. B.⁵, Prosolovich V. S.⁵, Yankovski Yu. N.⁵, Chornyi V. V.⁶

¹"Tsvetotron" Joint Stock Company

²Brest State Technical University

Brest, Belarus

³"INTEGRAL" Joint Stock Company

⁴Belarusian State Academy of Communications

⁵Belarusian State University

⁶Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Electrophysical characteristics of noise generator diodes are investigated, and simulation of structure consisting of noise generator diode connected in reverse direction and compensating diode connected in forward direction is carried out. It was found that the dependence of the microplasma breakdown voltage for these noise diodes on the temperature in the range of 24–125 °C is close to linear. This allows temperature compensation of the breakdown voltage of the noise diode by connecting it in series with a directly connected Schottky diode. It is shown that the degree of thermal compensation, characterized by the value of the angular coefficient of linear approximation of the dependence of the breakdown voltage on temperature, depends on the electrophysical parameters of the noise diode-generator and the compensating diode.

Keywords: noise generator diodes, temperature compensation, breakdown voltage, spectral density of noise voltage, noise cutoff frequency, operating temperature range.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Введение. Шумовые диоды (ШД), использующие эффект лавинного пробоя, обладают возможностью создавать целенаправленно сгенерированный шум, который используется в аппаратно-программных системах защиты информации и метрологии [1]. Однако величина напряжения лавинного пробоя обратносмещенного $p-n$ -перехода зависит температуры. Это приводит к значительному изменению величин постоянного напряжения пробоя, спектральной плотности напряжения шума (СПНШ), а также температурного коэффициента СПНШ. Вследствие этого ШД стабильно генерируют широкополосный шум с приемлемым коэффициентом корреляции лишь в узком диапазоне температур. Целью настоящей работы явилось проектирование термостабилизирующего устройства для ШД, работающего в широком диапазоне температур.

Методы исследования. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) шумовых диодов с целью установления влияния термокомпенсирующего диода на электрофизические параметры приборов проводились на измерителе параметров интервале температур 24–125°C. Моделирование структуры, включающей диод-генератор шума, включенный в обратном направлении, и компенсирующий диод, включенный в прямом направлении, проводилось в *COMSOL Multiphysics*. Исследовались диоды генераторы шума марок *ND102L*, *ND103L* и *ND104L*. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819.

Экспериментальные результаты. ШД проектируются таким образом, чтобы использовать преимущественно ударную ионизацию носителей заряда и лавинный пробой $p-n$ -перехода на начальном участке пробоя вольт-амперной характеристики (ВАХ). Измерение ВАХ при обратном включении диодов показало, что для ШД с увеличением температуры напряжение пробоя возрастает. Это обусловлено уменьшением энергии, которую носитель заряда может приобрести в электрическом поле между двумя столкновениями вследствие температурного уменьшения длины свободного пробега [2]. Таким образом, ШД имеют положительный температурный коэффициент напряжения пробоя (ТКН). Для обеспечения термостабильности обратной ветви ВАХ диода может быть последовательное соединение обратно-смещенного $p-n$ -перехода с положительной величиной температурного коэффициента напряжения и прямо смещенного $p-n$ -перехода с отрицательной величиной ТКН. Моделирование такой структуры показало, что наиболее перспективным является применение в качестве термокомпенсирующего элемента выпрямляющего контакта металл-полупроводник (диода Шоттки), имеющего отрицательный ТКН, включенного в прямом направлении. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, различающиеся рабочим током и временем

обратного восстановления (для 1N60 – $1 \cdot 10^{-9}$ с). В таблице приведены измеренные средние значения шумовых параметров диодов – генераторов шума *ND103L*, а также средние значения этих же шумовых параметров с включенными дополнительно последовательно компенсирующими диодами Шоттки 1N60 и 1N5819. Видно, что исследуемые шумовые параметры во всех случаях имеют зависимость от температуры близкую к линейной. Степень температурной компенсации может быть оценена по угловым коэффициентам усредненных прямых зависимости напряжения пробоя от температуры.

Таблица 1 – Средние значения шумовых параметров диодов в зависимости от температуры

Шумовые параметры	Типы ШД	Температура, °C		
		24	70	125
$U_{эфф}$, мВ	<i>ND103L</i>	115,30	85,76	49,94
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	98,88	72,20	49,94
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	98,6	70,00	36,42
СПНШ, мкВ/(Гц) ^{1/2}	<i>ND103L</i>	62,21	40,00	18,42
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	57,33	34,36	15,42
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	59,32	34,53	14,28
$F_{гр}$, МГц	<i>ND103L</i>	5,62	5,15	8,32
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	4,50	6,06	9,90
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	3,38	5,16	8,12
$U_{пр}$, В	<i>ND103L</i>	8,80	9,12	9,26
	<i>ND103L</i> + <i>1N5819</i>	8,94	9,06	9,30
	<i>ND103L</i> + <i>1N60</i>	9,11	9,26	9,39

Чем ближе модульное значение углового коэффициента $|k|$ в уравнении $y = kx + b$ (уравнение аппроксимированной прямой) к нулю, тем меньше зависимость шумового параметра от температуры. Было установлено, что угловой коэффициент $|k|$ составляет для ШД *ND103L* – 0,0045 В/К, при $b = 8,72$ В; для термокомпенсированных *ND103L*+*1N60* ($b = 9,04$ В) и *ND103L*+*1N5819* ($b = 8,87$ В) соответственно 0,0027 В/К и 0,0033 В/К. Таким образом, последовательное соединение ДШ и ШД позволяет произвести температурную компенсацию напряжения пробоя ШД. Следует отметить, что степень температурной компенсации больше у пары *ND103L*+*1N60*. Это обусловлено меньшим падением прямого напряжения для 1N60 при рабочем токе ШД и большей по сравнению с 1N5819 зависимостью прямой ветви ВАХ ДШ 1N60 от температуры. Очевидно, что величина степени термокомпенсации определяется электрофизическими параметрами компенсирующего диода.

Работа выполнена в рамках задания 3.11.3 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника».

Литература

1. Винокуров, С. А. Генераторы шума (обзор) / С. А. Винокуров, В. Н. Кочемасов, А. Р. Сафин // Изв.

вузов России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 6–32.

2. Грехов, И. В. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках / И. В. Грехов, Ю. Н. Сережкин. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 152 с.

УДК 621.822.7:621.7.083

ПЛАНЕТАРНАЯ ДОВОДКА ШАРИКОВ ИЗ КАМНЕСАМОЦВЕТНОГО СЫРЬЯ

Луговой В. П., Попов Р. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается модернизированное устройство доводки шариков, совершающих планетарное движение, что позволяет ускорить процесс их обработки.

Ключевые слова: устройство, доводка, шарик, камнесамоцветы.

PLANETARY FINISHING OF BALLS FROM GEMSTONE RAW MATERIALS

Lugovoi V. P., Popov R. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A modernized device for finishing balls performing planetary motion is being considered, which allows for speeding up the process of their processing.

Keywords: device, finishing, balls, gemstones.

*Адрес для переписки: Луговой В. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lugovoi@bntu.by*

В современных условиях шарик из неметаллов являются часто используемыми элементами украшений. Спрос на них неуклонно растет в различных отраслях, включая ювелирную. Такие шарик могут быть изготовлены из различных камнесамоцветных материалов, керамики, ситаллов, поли- и монокристаллических структур [1]. Зачастую они отличаются хрупкостью, что ограничивает применение многих известных способов для обработки твердых материалов. Сложность доводки шариков заключается в обеспечении их трехосного вращения с целью повышения равномерности шлифования по всему поверхности в абразивной среде и в результате – повышения точности формы и размеров.

Существует множество способов доводки шариков из металлов, большая часть из которых имитирует работу упорного подшипника, один из инструментов в котором имеет U-образную или V-образную канавку. Недостаток таких устройств заключается в том, что шарик получают в процессе обкатки преимущественно одно- или двухосное вращение [2], поэтому они не всегда применимы для обработки неметаллических шариков.

Широко используемым способом шлифования шариков из хрупких материалов, нашедшим применение в оптическом производстве, является способ, обеспечивающий планетарное движение заготовки между двумя дисками [3]. Данный способ дает необходимую точность обработки, однако не обладает высокой производительностью шлифования. Подобные схемы обработки предложены в устройствах, приведенных в [4–6].

Сложное движение шариков по замкнутой кривой второго порядка достигается в способе обработки шариков [7], в котором либо изменяется траектория движения инструмента-планшайбы, ей придается движение по эллиптической или любой

другой замкнутой кривой, либо изменяется скорость ее вращения. К недостаткам такого способа следует отнести усложненность привода планетарного движения планшайбы.

В статье [8] предложен метод обработки шариков в устройстве, которое позволяет изменить скорость и направление вращения шариков вокруг своих осей без дополнительных источников движения. Однако дополнительное движение шариков достигается при кратковременном изменении угловой скорости диска.

В настоящей работе предлагается модернизировать данное устройство для планетарной обработки шариков (рисунок 1, а), которое достигается путем применения дополнительной направляющей движения диска. Это позволяет достигнуть равномерного съема материала заготовки.

Устройство состоит из привода с кривошипом, стола с оснасткой, совершающего планетарное движение, и диска с коническими отверстиями, который служит инструментом.

Шарик 1 находится между диском с коническими отверстиями 2, и столом 4. Стол 4 совершает планетарное движение, передаваемое ему кривошипом 8. Верхний диск 2 получает периодическое движение, возникающее при касании его боковой поверхности с губчатой резиной полукруглой направляющей 6. Для увеличения трения стол 4 покрыт листовой резиной 3. Таким образом осуществляется совместное движение стола 4 (с угловой скоростью ω) и (циклическим дополнительным движением $S_{\text{доп}}$) диска 2. Для увеличения трения шарика 1 на палец 5 воздействует нагрузка Р. Нагрузка так же способствует интенсивности съема материала заготовки. Траектория движения шарика при этом способе обработки имеет вид сложной циклоиды

(рисунок 1, б). Для одного полного оборота диска вокруг своей оси и замыкания циклоиды необходимо не менее восьми поворотов кривошипа. Такая траектория имеет два циклически повторяющихся участка. Участок 1 характерен плавным изменением вектора скорости шарика и имеет радиус аппроксимации, совпадающий с радиусом U-образной направляющей. Участок 2 характерен изменением вектора скорости шарика по радиусу плеча кривошипа. Чередования двух этих участков на траектории и придает необходимое движение шарика для его равномерной обработки.

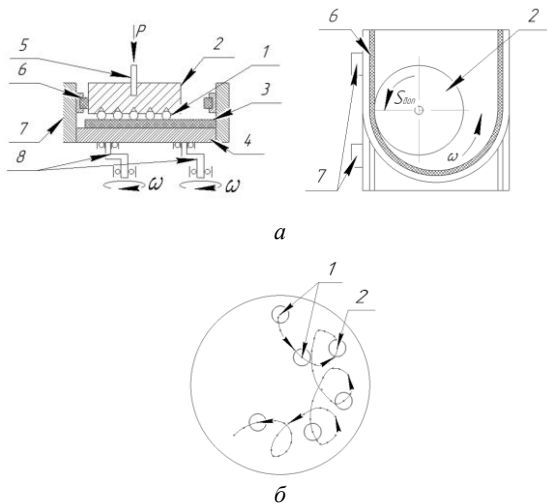


Рисунок 1 – Схема устройства для осуществления планетарной обработки шариков (а) и траектория движения шарика при таком способе (б)

Литература

1. Технология обработки ювелирных камней: учебное пособие / В. П. Луговой. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 315 с. – (Высшее образование).
2. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Мн.: Наука и техника, 1976. – 328 с.
3. Михнев, Р. Л. Оборудование оптических цехов: учебник для техникумов / Р. Л. Михнев, С. К. Штандель. – М.: Машиностроение, 1991. – 367 с.
4. Способ шлифования шариков: пат. 1510250 Рос. Федерация: МПК В24В 11/02 / Л. Н. Васин, И. Коробченко; заявитель и патентообладатель ВНИИ абразивов и шлифования. – № 4645892/08; заявл. 15.03.1991; опубл. 10.12.1995, Бюл. № 34. – 5 с.
5. Способ обработки шариков из оптических материалов: авт. св. 31572794 СССР: МПК В24В 11/02 / Н. Н. Николаев, А. Орбинский, Т. М. Акрамовская; заявитель Ленинградское оптико-механическое объединение. – № 4567890/08; заявл. 12.01.1988; опубл. 23.06.1990, Бюл. № 23. – 3 с.
6. Способ обработки шариков: авт. св. 1787747 СССР: МПК В24В 11/02 / К. Г. Щетникович, Б. Б. Стальмошонок; заявитель Белорусский государственный технологический университет. – № 4789654/08; заявл. 20.05.1991; опубл. 15.01.1993, Бюл. № 2. – 4 с.
7. Устройство для обработки шариков: авт. св. 1713819 СССР: МПК В24В 11/02 / А. С. Лобанкин; заявитель Московский станкоинструментальный институт. – № 4723561/08; заявл. 10.11.1990; опубл. 23.02.1992, Бюл. № 7. – 3 с.
8. Луговой, В. П. Шлифование шариков из натурального камня / В. П. Луговой, Р. А. Попов // Наука и техника. – 2022. – Т. 65, № 4. – С. 45–52.

УДК 621.1: 679.8

СПОСОБ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Луговой В. П., Попов Р. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен способ шлифования шариков из неметаллических материалов с использованием ультразвуковых колебаний.

Ключевые слова: шарики из неметаллических материалов, обработка, способ, ультразвуковые колебания.

A METHOD FOR ULTRASONIC TREATMENT OF BALLS MADE OF NON-METALLIC MATERIALS

Lugovoi V. P., Popov R. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A method for grinding balls made of non-metallic materials using ultrasonic vibrations is proposed.

Keywords: non-metallic balls, processing, method, ultrasonic vibrations is proposed.

Адрес для переписки: Луговой В. П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lugovoi @bntu.by

Твердые неметаллических материалы (ситаллы, керамика и монокристаллические структуры) широко используются в приборостроении и машиностроении. Такие материалы имеют ряд эксплуатационных качеств: широкий диапазон рабочих температур; низкие коэффициенты теплового расширения; химическую

и коррозионную стойкость. Шарики из этих материалов могут служить в качестве деталей подшипников, а также быть частью оптических систем или в качестве вставок в ювелирных изделиях [1]. Однако высокая твердость, а вместе с тем и хрупкость сужают спектр способов изготовления этих деталей.

Наиболее широко применимым способом обработки шариков из твердых неметаллических материалов является алмазно-абразивная доводка группы деталей между двумя дисками, в работе [2] таким способом обрабатывают шары из керамики. Недостатком такой технологии обработки шариков между вращающимися дисками является низкая производительность, которая сопровождается образованием сколов и вырыванием кластеров из поверхностного слоя, которые влияют на формирование шероховатости поверхностного слоя.

Перспективными методами являются процессы абразивной обработки шариков в поле ультразвуковых колебаний разработанные В. П. Луговым [3,4] и Г. А. Есьманом [5]. Было установлено, что использование ультразвуковых колебаний в процессе абразивной доводки стальных шариков, позволяет получить положительный эффект по производительности и по параметрам точности обработанных заготовок.

Известен также ультразвуковой способ абразивной обработки открытых сферических поверхностей [6], в котором шарик служит инструментом, прижимаемым сверху торцом ультразвукового концентратора.

Колебания концентратора передаются шарiku и приводят его в беспорядочное вращение, обеспечивая сьем обрабатываемого материала, расположенного под инструментом.

Исследованиями М. Г. Киселева [7, 8] было установлено, что на процесс трения скольжения, свойственный для абразивной обработки, существенное влияние оказывает направление ультразвуковых колебаний. Были рассмотрены три варианта схем направления действия ультразвуковых колебаний: перпендикулярно или касательно к поверхности трения скольжения, которые показали, что каждая из них имеет отличительные кинематические и динамические условия взаимодействия контактируемых поверхностей.

Для изучения влияния ультразвуковых колебаний на обработку шариков из твердых неметаллических материалов была разработана экспериментальная установка.

На основании рассмотренной литературы выбрана схема обработки, где направленные ультразвук перпендикулярно кругу и на ее основе разработан способ абразивной обработки с применением ультразвуковых колебаний (рисунок 1, а). Экспериментальная установка состоит из ограничного станка модели СУН 3435 и ультразвукового преобразователя с коническим концентратором колебаний. На рабочем торце концентратора закреплен сменный инструмент с тороидальным углублением для размещения в нем обрабатываемого шарика.

Разработанная схему обработки показана на рисунке (рисунок 1, б). Обрабатываемый шарик 1 при шлифовании размещается между сменным инструментом-наконечником 3, соединенного с ультразвуковым концентратором 4 и вращающимся диском 2 с V-образной канавкой.

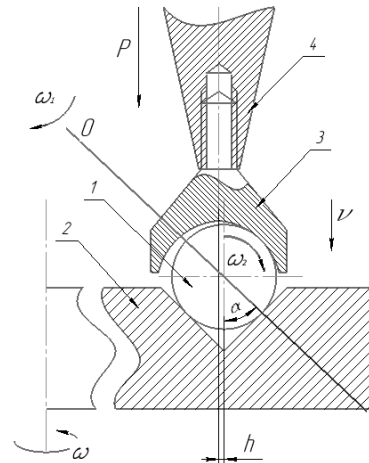


Рисунок 1 – Фотография и схема обработки шарика с применением ультразвуковых колебаний

Сущность способа ультразвуковой обработки неметаллических шариков заключается в придании шарiku сложного движения, за счет колебательного воздействия верхнего инструмента на заготовку, вращающуюся в канавках нижнего диска. Диск 2 вращается с угловой скоростью ω . Шарик 1 прижат к диску 2 регулируемой силой P . Шарик 1 имеет ось вращения OO , наклоненную относительно нормали плоскости диска 2 на некоторый угол α , который образуется при смещении оси концентратора 4 относительно оси симметрии канавки на расстояние h . Шарик 1 получает вращение с угловой скоростью ω_1 при вращении диска 2 вокруг оси OO . Действие ультразвуковых колебаний вызывает дополнительное вращение шарика в плоскости рисунка (рисунок 1, б) с угловой скоростью ω_2 , а в результате сложения векторов скоростей, имеющих различное направление, возникает сложное трехосное вращение, способствующее интенсификации процесса шлифования.

Литература

1. Технология обработки ювелирных камней: учебное пособие / В. П. Луговой. – Москва: ИНФРА, 2025. – 315 с.
2. Алмазная доводка керамических шаров из карбида бора / С. Сохань [и др.] // Оборудование и инструмент. – 2018. – № 3. – С. 57–61.
3. Луговой, В. П. Использование ультразвуковых колебаний при шлифовании шариков / В. П. Луговой,

Н. М. Волк, И. С. Луговая // Приборостроение – 2014: материалы конференции, Минск, ноябрь 2014 г. – Мн.: БНТУ, 2014. – С. 346–347.

4. Луговой, В. П. Исследование процесса доводки шариков в поле ультразвуковых колебаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Мн., 1980. – 22 с.

5. Есьман, Г. А. Интенсификация процесса беззлеватормой доводки шариков с помощью ультразвука: автореф. дис. ... канд. наук: 05.02.08. – Мн., 1984. – 18 с.

6. Устройство для обработки открытых сферических поверхностей: авт. св. 191328 СССР: МПК В24В 11/02 / А. Л. Горбунов, Е. П. Коменоп, В. М. Салтанов. – заявл. 12.08.1966; опубл. 09.02.1967, Бюл. № 5. – 3 с.

7. Киселев, М. Г. Исследование некоторых параметров процесса трения скольжения в ультразвуковом поле: автореф. дис. ... канд. наук: 01.02.04. – Мн., 1973. – 23 с.

8. Устройство для доводки шаров: авт. св. 1128456 СССР: МПК В24В 11/02, В24В 1/04 / М. Г. Киселев. – заявл. 15.03.1982; опубл. 07.01.1984, Бюл. № 1. – 4 с.

УДК 681

КОРРЕЛЯЦИЯ СОБЫТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ В SIEM СИСТЕМЕ

Медведев Н. В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Управление инцидентами информационной безопасности заключается в целенаправленных действиях руководства организации, должностных лиц и службы безопасности банка, которые направлены на анализ возникающих инцидентов информационной безопасности и адекватное реагирование на угрозы, возникающие в результате инцидентов. SIEM (Системы управления событиями и информацией о безопасности) – это класс программно-аппаратных продуктов для мониторинга и анализа событий информационной безопасности, собирающих и коррелирующих данные из различных источников.

Ключевые слова: SIEM система, корреляция, правила корреляции.

CORRELATION OF SECURITY EVENTS IN SIEM SYSTEM

Medvedev N. V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Annotation. Information security incident management consists of targeted actions by the organization's management, officials and the bank's security service, which are aimed at analyzing emerging information security incidents and adequately responding to threats arising from the incidents. SIEM (Event and Security Information Management Systems) is a class of software and hardware products for monitoring and analyzing information security events that collect and correlate data from various sources.

Keywords: SIEM system, correlation, correlation rules.

Адрес для переписки: Медведев Н. В., Москва, 107005 Вторая Бауманская 5, МГТУ, каф. ИУ8 medvedevnick54@yandex.ru

Security Information and Event Management (SIEM) – Управление информацией и событиями в системе безопасности – общее название средств защиты информации, ранее используемых по отдельности друг от друга, категории SIM (Security Information Management – управление информацией в системе безопасности) и SEM (Security Event Management – управление событиями в системе безопасности).

В SIEM системах часто выделяет следующие уровни (рисунок 1): уровень сбора данных; уровень управления данными; уровень анализа данных. Программные агенты реализуют сбор событий безопасности, которые быстро анализируются и фильтруются по типу.

На сегодняшний день существует несколько способов решения поставленной задачи, но им присущ ряд недостатков [1]. Стоит отметить, что ни один из существующих подходов не вводит каких-либо ограничений или критериев для определения событий, подлежащих регистрации на источниках событий, в том числе отсутствует количественный учет влияния факта регистрации событий на работоспособность самого источника событий, т. е. деградации производительности источника событий.

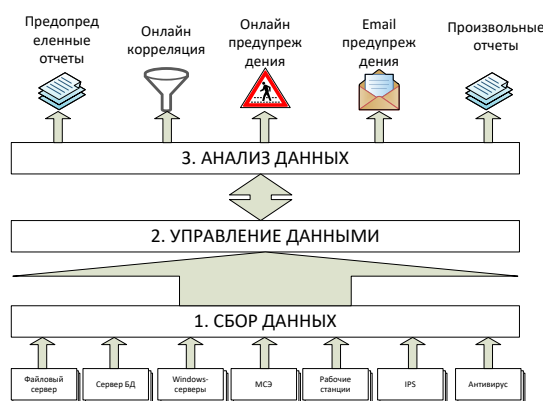


Рисунок 1

Таким образом, возникает противоречие между потребностями практики в выявлении максимального количества инцидентов информационной безопасности (ИБ) с использованием SIEM систем на базе зарегистрированных событий и минимизации влияния регистрации событий на работу источника событий, т. е. уменьшения количества регистрируемых событий, другими словами, необходимость поиска баланса между

защищенностью автоматизированной информационной системы предприятия, доступностью источника событий и подотчетностью.

Внедрение SIEM системы – основной и критически важный этап во всем жизненном цикле использования системы внутри ИС. При этом важен не только этап первоначальной настройки, но и дальнейшее тестирование системы в течение нескольких месяцев. В ходе этого тестирования экспертами ИБ изучаются собираемые события безопасности, а также составляются и корректируются правила корреляции – цепочка событий безопасности и других условий, при выполнении которых можно говорить о том, что произошел инцидент информационной безопасности.

Термин корреляция используется в более узком смысле, чем в статистике, неотрывно от слова «правило». В данной предметной области этот термин обозначает, что правило состоит из сочетания нескольких событий, которые могут произойти во время работы системы. Основным отличием от математической корреляции является то, что правила корреляции создаются вручную аналитиками /2/ между событиями не обязательно существует корреляционной связи – то есть изменение одного события не всегда вызывает изменения другого. При внедрении SIEM системы в информационную систему необходимо учитывать не только топологию сети, но и функциональные возможности аппаратных средств, которые используются в системе. Это накладывает ограничения на количество событий информационной безопасности, которые может собрать и передать дальше в SIEM-систему каждый сенсор.

Для формализации задачи необходимо определить соотношение событий ИБ с правилами выявления инцидентов ИБ, которые установлены в SIEM, а также с самими инцидентами информационной безопасности.

Таким образом, необходимо выбрать наибольшее количество правил для SIEM-системы, которое позволит обнаружить максимальное число различных инцидентов с учетом производительности сенсоров, используемых в ИС.

Регистрировать события, определенные на источнике событий «по умолчанию», – зачастую производители источников событий «по умолчанию» регистрируют минимальный набор событий (вплоть до полного отсутствия регистрации каких-либо событий), в связи с этим данный способ может не отражать потребности конкретного предприятия и, как следствие, приводить к пропуску ценных для ИБ предприятия событий, несмотря на это, данный способ самый популярный;

Регистрировать абсолютно все события – данный способ может приводить к перерасходу ре-

сурсов источника событий (вплоть до полного отказа в работе), а также зашумляет работу SIEM-системы и усложняет выявление действительно ценных для ИБ предприятия событий;

Регистрировать события, выявленные по результатам опытной эксплуатации SIEM-системы, – данный способ наиболее предпочтителен, но, учитывая ограниченность периода опытной эксплуатации SIEM-системы (обычно не более нескольких месяцев) и нестатистическую природу возникновения событий, он может приводить к пропуску ценных для ИБ предприятия событий, которые не были зафиксированы на этапе опытной эксплуатации SIEM системы.

При внедрении SIEM системы в информационную систему необходимо учитывать не только топологию сети, но и функциональные возможности аппаратных средств, которые используются в системе. Это накладывает ограничения на количество событий информационной безопасности, которые может собрать и передать дальше в SIEM систему каждый сенсор.

Для формализации задачи определим соотношение событий ИБ с правилами выявления инцидентов ИБ, которые установлены в SIEM, а также с самими инцидентами информационной безопасности.

Таким образом, необходимо выбрать наибольшее количество правил для SIEM системы, которое позволит обнаружить максимальное число различных инцидентов с учетом производительности сенсоров, используемых в системе. Источники событий могут варьироваться от самой физической среды, например температуры, регистрируемой датчиком, до сложных компьютерных систем, обрабатывающих большие объемы данных. Их объединяет то, что команды, которые ими управляют, хотят централизовать сбор и обработку событий безопасности на единой платформе, что позволяет эффективно управлять операционным контекстом безопасности. Этот мониторинг событий безопасности имеет важное значение для обнаружения аномалий в режиме реального времени, вызывая необходимые предупреждения для дальнейшего расследования.

Литература

1. Применение технологии управления информацией и событиями безопасности для защиты информации в критически важных инфраструктурах / И. В. Котенко [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2023. – № 20. – С. 125–145.
2. Miller, D. R. Security information and event management (SIEM) implementation / D. R. Miller, Sh. Harris, A. Harper, S. VanDyke, C. Blask. – New York: McGraw-Hill, 2021. – 464 p.
3. Subhani, A. B. Stay Safe! / A. B. Subhani. – AbbottPress, 2016. – 182 p.

УДК 621.318.434

НОВЫЙ УРОВЕНЬ МАГНИТОКАРДИОГРАФИИ**Мирошников В. В., Гречишкина Н. В., Неделько А. А.***ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени В. Даля», Луганск, Россия*

Аннотация. Магнитокардиография является наиболее информативным методом диагностики заболеваний сердца. Чтобы сделать метод более доступным предлагается использовать феррозонды в качестве чувствительного элемента. Для достижения требуемой чувствительности рассматривается резонансный метод работы выходной обмотки феррозонда при работе на емкостную нагрузку. Это позволяет на 2–3 порядка повысить чувствительность феррозонда.

Ключевые слова: магнитокардиография, феррозонд, резонанс, чувствительность.

A NEW LEVEL OF MAGNETOCARDIOGRAPHY**Miroshnikov V. V., Grechishkina N. V., Nedelko A. A.***Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Russia*

Abstract. Magnetocardiography is the most informative method for diagnosing heart diseases. To make this method more accessible, it is proposed to use ferrosendes as sensitive elements. To achieve the required sensitivity, a resonant method of operating the output winding of the ferrosende under capacitive load is considered. This allows you to increase the sensitivity of the ferrosende by 2–3 orders of magnitude.

Keywords: magnetocardiography, ferrozond, resonance, sensitivity.

Адрес для переписки: Мирошников В. В., кв. Молодежный, 20А, г. Луганск 291034, Луганская Народная Республика, Россия.

e-mail: prorectormvv@mail.ru

Магнитокардиография не требует прямого контакта с объектом, т. е. позволяет проводить измерения через повязку или другую преграду. Это не только практически удобно, но и составляет принципиальное преимущество перед электрическими методами регистрации данных, так как места крепления электродов на коже могут быть источником медленно меняющихся контактных потенциалов [1].

По изменению магнитного поля миокарда можно гораздо раньше, чем это выявит электрокардиограф, обнаружить нарушения сердечного ритма, начало ишемической болезни сердца. Магнитное поле сердца является самым сильным из всех биомагнитных полей (у взрослого 10^{-10} Тл). Для того, чтобы зарегистрировать слабое магнитное поле, создаваемое токами в сердце, нужно иметь чувствительный датчик. Примером такого датчика является сверхпроводниковый квантовый интерферометр (СКВИД).

Большую социальную значимость имеет развитие методов биомагнитных измерений и магнитометрической аппаратуры для ранней диагностики и эффективной терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, поскольку в большинстве стран мира на их долю приходится около 70 % всех смертных случаев.

Учитывая вышеизложенное, предлагаем заменить очень дорогостоящий магниточувствительный элемент СКВИД, требующий охлаждения азотом, на работающий без охлаждения ферромагнитный магниточувствительный элемент.

Режим параметрического резонанса резко повышает коэффициент преобразования феррозондового датчика. Из теории параметрического возбуждения электрических колебаний в LC-контуре известно, что наиболее устойчивый резонанс

наблюдается на частоте вдвое большей, чем частота изменения одного из параметров контура в рассматриваемом случае: его индуктивности. Применительно к феррозонду с выходом на второй гармонике это означает, что проницаемость сердечников, а, следовательно, и индуктивность измерительной обмотки должны изменяться с частотой четвертой гармоники. Зависимость индуктивности обмотки феррозондов от времени можно представить так

$$L(t) = L_0(1 + \Gamma_2 \cos 2\omega t + \Gamma_4 \cos 4\omega t),$$

где $\Gamma_2 = \frac{L_2'}{L_0}$, $\Gamma_4 = \frac{L_4'}{L_0}$ – коэффициенты ряда; L_0 , L_2 и L_4 – постоянная составляющая амплитуды второй и четвертой гармоник индуктивности соответственно.

Ток в контуре выходной цепи, настроенный на частоту $2\omega = \frac{1}{\sqrt{2L_0C}}$ будет:

$$i_2(t) = I_{m2} \sin(2\omega t + \phi).$$

Выходное напряжение феррозонда будет равным $U_{2n} = \frac{d}{dt}[L(t)i_2(t)]$.

При этом окажется, что член, пропорциональный коэффициенту Γ_2 , будет содержать только постоянную составляющую и четвертую гармонику, а член, пропорциональный коэффициенту Γ_4 – вторую и шестую гармоники [2].

Для второй гармоники выходного сигнала напряжения при $\phi = \frac{\pi}{4}$ имеем:

$$\begin{aligned} U_2(\Gamma_4) &= \mp \omega L_0 \Gamma_4 I_2 \cos\left(2\omega t \mp \frac{\pi}{4}\right) \\ &= -X_L I_2 \sin\left(2\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned}$$

Из этого выражения видно, что величина $X_L = \omega L_0 \Gamma_4$ ведет себя как отрицательное сопротивление по отношению к току i_2 .

При кусочно-линейной аппроксимации кривой перемагничивания сердечников и синусоидальной волне поля возбуждения коэффициенты ряда Фурье, которым представляется зависимость дифференциальной электромагнитной проницаемости, будут равны [3–5].

Постоянная составляющая

$$\mu_{g0} = \mu \frac{\theta}{\pi g_{max}}$$

гармоники

$$\mu_{g2n} = \mu \frac{1}{\pi} \sin 2g_{max}.$$

Здесь: $\theta = \arcsin \frac{H_S}{H_m}$; H_S – напряженность насыщения; H_m – амплитуда тока возбуждения.

При $\theta = \frac{\pi}{4}$ ($H_m = \sqrt{2}H_S$) имеются оптимальные условия для возникновения тока второй гармоники, однако параметрического усиления сигнала в этом случае нет. Это происходит потому, что коэффициент μ_{g4} при $\theta = \frac{\pi}{4}$ равен нулю. При $\theta = \frac{\pi}{8}$ или $\theta = \frac{3\pi}{8}$ коэффициент μ_{g2} несколько уменьшается, но зато достигает максимального значения коэффициент μ_{g4} .

При резонансе коэффициент передачи феррозондового датчика увеличивается на 2–3 порядка, что позволяет обойтись без фильтров второй гармоники и без резонансных усилителей. При этом возрастает устойчивость всей измерительной схемы, которая охватывается очень глубокой отрицательной обратной связью улучшающей метрологические характеристики измерительного тракта.

Рассмотрим трансформаторную схему феррозондового датчика.

Если зависимость $B(H)$ для материала электромагнитного модулятора разложить в ряд Тейлора в окрестности точки $H = H_1$, то в результате получится

$$B(H) = B(H_1) + \frac{\partial B}{\partial H} \Big|_{H=H_1} \cdot \Delta H + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial H^2} \Big|_{H=H_1} \cdot \Delta H^2 + \dots \quad (1)$$

Для двух сердечников феррозонда можно записать

$$B_I = B(H_1 + H_2 + H_0); B_{II} = B(H_1 - H_2 - H_0),$$

где H_1 – напряженность, созданная током возбуждения; H_2 – напряженность, созданная схемой, показанной на рисунке 1 током i_2 ; H_0 – напряженность измеряемого поля.

Потокоцепления катушек феррозондов описываются следующими соотношениями:

$$\psi_I = \frac{W^2 \cdot S}{l} \cdot B(i_1 + i_2 + i_0);$$

$$\psi_{II} = \frac{W^2 \cdot S}{l} \cdot B(i_1 - i_2 - i_0),$$

или

$$\begin{aligned} \psi_I - \psi_{II} &= \mu_0 \frac{2W^2 \cdot S}{l} \cdot \mu_g(H) \cdot (i_2 + i_0) \\ &= L(H) \cdot (i_2 + i_0) \\ \mu(H) &= \frac{dB}{dH}. \end{aligned} \quad (2)$$

Э.Д.С. индукции в выходной обмотке феррозонда равна

$$\frac{d}{dt}(\psi_I - \psi_{II}) = L_0 \left(\frac{di_2}{dt} \mu + i_2 \frac{d\mu}{dt} + i_0 \frac{d\mu}{dt} \right). \quad (3)$$

В дальнейшем обозначается:

$$\begin{aligned} \mu' &= \frac{d\mu}{dt}, \\ L_0 &= \frac{2\mu_0 W^2 S}{l}. \end{aligned}$$

Для схемы, приведенной на рисунке 1, можно записать следующие очевидные соотношения:

$$(L_0 \mu i_2 + L_0 i_0)' - u_c = v, \quad (4)$$

$$i_2 = i_R + i_c = \frac{u_c}{R} + C \frac{du_c}{dt}. \quad (5)$$

При подстановке (5) в (4) получается

$$CL_0 \mu \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \left[L_0 \mu' C + \frac{L_0 \mu}{R} \right] \frac{du_c}{dt} + \left[L_0 \mu' \frac{1}{R} + 1 \right] u_c = -L_0 \mu' i_0. \quad (6)$$

Решение (4) ищется в виде:

$$u_c = M \cos 2\omega t + N \sin 2\omega t, \quad (7)$$

тогда

$$u_c' = -2\omega M \sin 2\omega t + 2\omega N \cos 2\omega t. \quad (8)$$

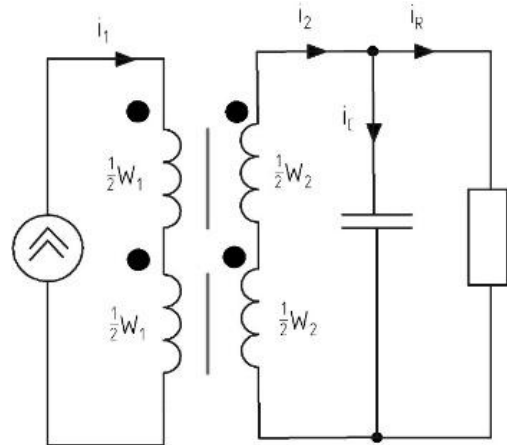


Рисунок 1 – Трансформаторная схема феррозондового датчика

Литература

1. Полякова, И. П. Магнитокардиография: историческая справка, современное состояние и перспективы клинического применения / И. П. Полякова // Креативная кардиология. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 103–133.

2. Афанасьев, Ю. В. Состояние и перспективы развития феррозондовой магнитометрии / Ю. В. Афанасьев // Геофизическая аппаратура. – Л.: Недра, 1977. – Вып. 60. – С. 3–15.

3. Serson, P. N. A Portable electrical magnetometer / P. N. Serson, L. W. Hannaford // Canadian Journal of Technology. – 1976. – Vol. 34. – P. 232–243.

4. Средства измерения параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов [и др.]. – Л.: Энергия. Ленингр. отдел., 1979. – 320 с.

5. Яковлев, Н. Н. Особенности работы феррозондового датчика в резонансном режиме / Н. Н. Яковлев // Геофизическая аппаратура. – Л.: Недра, 1968. – Вып. 35. – С. 92–101.

УДК 537.86

О ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ БЕГУЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Невдах В. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Приводятся решения волновых уравнений для напряженностей электрического и магнитного полей, согласующиеся с физическим смыслом уравнений Максвелла. Показано, что в бегущей электромагнитной волне характер тройки векторов E , H и u меняется с правовинтовой на левовинтовую через каждую четверть длины волны. Плотность потока энергии такой волны физически корректно описывается вектором Умова, а не вектором Пойнтинга.

Ключевые слова: бегущая электромагнитная волна, плотность потока энергии, вектор Умова.

ON THE ENERGY FLOW DENSITY OF A TRAVELING ELECTROMAGNETIC WAVE

Nevdakh V. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Solutions of wave equations for electric and magnetic field strengths are given, consistent with the physical meaning of Maxwell's equations. In a traveling electromagnetic wave the character of the triple of vectors E , H and u changes from right-handed to left-handed after every quarter of the wavelength is shown. The energy flux density of such a wave is physically correctly described by the Umov vector, and not by the Poynting vector.

Keywords: traveling electromagnetic wave, energy flow density, vector Umov.

Адрес для переписки: Невдах В. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: nevдах@bntu.by

Основными параметрами переменного электромагнитного поля являются зависящие от координат и времени вектора напряженности $E(x, y, z, t)$ и индукции $D(x, y, z, t)$ электрического и вектора напряженности $H(x, y, z, t)$ и индукции $B(x, y, z, t)$ магнитного полей. В классической электродинамике переменное электромагнитное поле в однородном покое диэлектрике, в котором отсутствуют свободные заряды (плотность зарядов $\rho = 0$) и постоянный ток проводимости (плотность тока $j = 0$), описывается системой уравнений Максвелла, имеющей в дифференциальной форме вид

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (6)$$

где ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные вакуума, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Уравнения (1)–(6) связывают величины, характеризующие компоненты электромагнитного поля с их источниками в каждой точке пространства.

Согласно уравнениям (1) и (2) изменение во времени магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле, а изменение во времени электрической индукции порождает вихревое магнитное поле. Знак «–» в (1) соответствует правилу Ленца для направления индукционного тока. Из уравнений Максвелла получаются два одинаковых по виду волновых уравнения, описывающих изменения во времени и пространстве векторов E и H . Они дают, что волны напряженностей электрического и магнитного полей, распространяются с одинаковой фазовой скоростью $u = 1/\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0} = c/\sqrt{\epsilon \mu}$ в рассматриваемом однородном диэлектрике, где $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – скорость распространения этих волн в вакууме.

Рассмотрим свойства полученных волн векторов E и H на примере свойств волн, распространяющихся в простейшем одномерном случае, например, вдоль оси OZ . Очевидно, что в этом случае их компоненты E_z и H_z не изменяются вдоль осей OX и OY и из уравнений (1) и (2) следуют другие уравнения

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}. \quad (10)$$

Видно, что в уравнения (7) и (8) входят пара компонент напряженностей E_x и H_y , а в (9) и (10) – пара компонент E_y и H_x . Из уравнений (7) и (8) для первой пары компонент получаются волновые уравнения

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad (11)$$

и

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2}, \quad (12)$$

а из уравнений (9) и (10) для другой пары компонент получаются волновые уравнения

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (13)$$

и

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 H_x}{\partial t^2}. \quad (14)$$

Обе пары векторов E_x, H_y и E_y, H_x являются равноправными решениями уравнений Максвелла. Но вместе со скоростью распространения волн u они образуют разные тройки векторов. Если их брать по отдельности, то получается, что одновременно существуют две волны с различными ориентациями векторов E и H , чего быть не может.

Следовательно, нужно выбирать такие решения, которые согласуются с физическим смыслом уравнений Максвелла (1) и (2) и описывают одну электромагнитную волну. Из уравнения (1) следует, что вихревое электрическое поле появляется при уменьшении скорости изменения магнитной индукции, тогда как из уравнения (2) следует, что вихревое магнитное поле появляется при увеличении скорости изменения индукции (напряженности) электрического поля.

Это означает, что если решение волнового уравнения (11) для E_x берется в виде гармонической функции, например, типа $\cos$, то физически корректным решением волнового уравнения (12) для H_y будет гармоническая функция типа $\sin$. Другими словами, физически корректными решениями волновых уравнений (11) и (12) являются решения в виде [1]

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \quad (15)$$

и

$$H_y = -H_{y0} \sin(\omega t - kz), \quad (16)$$

где $\omega = 2\pi/T$ – циклическая (угловая) частота, T – период колебаний электрической и магнитной компонент электромагнитного поля, k – волновое число. Подстановка решений (15) и (16) в

уравнения Максвелла (7) и (8) позволяет получить соотношения

$$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E_{x0} = \sqrt{\mu \mu_0} H_{y0}, \quad (17)$$

и

$$\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}} = u, \text{ где } k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (18)$$

где $\lambda = uT$ – длина волны.

Из выражений (15) и (16) видно, что для любого заданного момента времени характер тройки векторов E_x, H_y и u меняется в пространстве через каждую четверть длины волны. Например, в момент времени $t = 0$, на интервале от 0 до $\lambda/4$ эти вектора образуют правую тройку, на интервале от $\lambda/4$ до $\lambda/2$ они образуют левую тройку, на интервале $\lambda/2 - 3\lambda/4$ – опять правую, на интервале $3\lambda/4 - \lambda$ – опять левую и т. д.

Отсюда следует, что плотность потока энергии такой бегущей электромагнитной волны – количества энергии, переносимой волной через единичную площадь в единицу времени, не описывается вектором Пойнтинга [2]

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (19)$$

который может быть применен только для единственной ориентации векторов E и H , например, E_x и H_y , тогда как согласно (3.20')–(3.24') таких ориентаций в электромагнитной волне две. Кроме волн с E_x и H_y еще существует и волна с E_y и H_x . В соответствии с физическим смыслом понятия «плотность потока энергии», эта величина для бегущей электромагнитной волны (3.31) и (3.32) может быть корректно описана произведением плотности энергии волны w на ее скорость u , т. е. величиной, которая называется вектором Умова

$$\vec{I} = w\vec{u}. \quad (20)$$

В работе показано, что бегущая электромагнитная волна описывается выражениями (15) и (16), согласующимися с физическим смыслом уравнений Максвелла. В такой волне характер тройки векторов E, H и u меняется с правовинтовой на левовинтовую через каждую четверть длины волны, поэтому вектор Пойнтинга не применим для описания плотности потока ее энергии. Плотность потока энергии бегущей электромагнитной волны физически корректно описывается вектором Умова.

Литература

1. Невдах, В. В. Электромагнитные волны в теории Максвелла / В. В. Невдах // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 222–228.
2. Halliday, D. Fundamentals of physics / D. Halliday, R. Resnick, J. Walker. – John Wiley & S., 2010. – 1330 p.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕМ ПОСЛЕ БЫСТРОГО И ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Пилипенко В. А.¹, Анищик В. М.², Понарядов В. В.², Жигулин Д. В.¹, Шестовский Д. В.¹¹Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»²Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Метод вторично-ионной масс-спектрометрии является одним из основных методов по изучению элементного, химического и изотопного состава вещества. Благодаря своей высокой чувствительности он нашел широкое применение в микроэлектронике по изучению диффузионных явлений в тонких (от 1 нм) пленках полупроводниковых изделий. Данный метод позволяет определять концентрацию легирующей примеси, получать профили ее распределения, определять элементный состав вещества. С помощью вторично-ионной масс-спектрометрии была исследована граница раздела алюминий-поликремний после длительного и быстрого термического отжига. Установлено, что при длительном термическом отжиге (450 °C, 20 мин) происходит полное растворение поликремния в алюминии. Однако при быстром термическом отжиге (450 °C, 7 с) такого явления не обнаружено, что является следствием локального протекания диффузионных процессов на границе раздела алюминия с поликремнием.

Ключевые слова: омический контакт, граница раздела алюминий-поликремний, быстрая термообработка, интегральная микросхема, вторично-ионная масс-спектрометрия.

APPLICATION OF SECONDARY-ION MASS SPECTROMETRY TO STUDY THE INTERACTION OF ALUMINUM METALLIZATION WITH POLYCRYSTALLINE SILICON AFTER RAPID AND LONG-TERM THERMAL ANNEALING

Pilipenko V. A.¹, Anishchik V. M.², Ponaryadov V. V.², Zhyhulin D. V.¹, Shestovski D. V.¹¹Joint Stock Company «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company²Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. The method of secondary ion mass spectrometry is one of the main methods for studying the elemental, chemical and isotopic composition of a substance. Due to its high sensitivity, it has found wide application in microelectronics for studying diffusion phenomena in thin (from 1 nm) films of semiconductor products. This method allows one, obtain the concentration of a dopant, construct its distribution profiles, and determine the elemental composition of a substance. The aluminum-polysilicon interface was investigated using secondary ion mass spectrometry after long-term and rapid thermal annealing. It was established that during long-term thermal annealing (450 °C, 20 min) complete dissolution of polysilicon in aluminum occurs. However, no such phenomenon was observed during rapid thermal annealing (450 °C, 7 s), which is a consequence of the local diffusion processes at the aluminum-polysilicon interface.

Keywords: ohmic contact, aluminum-polysilicon interface, rapid thermal, integrated circuit, secondary ion mass spectrometry.

Адрес для переписки: Жигулин Д. В., ул.Казинца И. П., 121А, г Минск 220108, Республика Беларусь, e-mail: zhyhulin@mail.ru

Введение. Термический отжиг – одна из основных операций в технологическом процессе производства изделий микроэлектроники. От правильно подобранных режимов зависит процент выхода годных изделий. С уменьшением проектных норм уменьшается и длительность термического отжига [1, 2]. Стандартный процесс формирования омических контактов при длительном термическом отжиге (450 °C, 20 мин) может быть заменен на быстрый термический отжиг [1, 2]. Такая тенденция обусловлена диффузионными процессами, происходящими на границе раздела алюминия и поликремния.

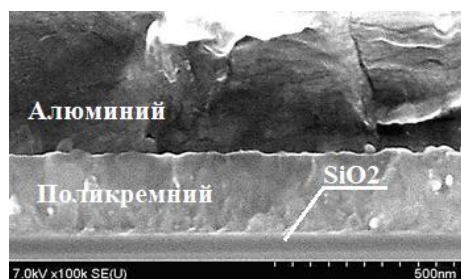
Экспериментальные результаты. Для изучения взаимодействия алюминия (Al) с поликремнием (ПКК) была изготовлена

структура Al (1,5 мкм) – ПКК (0,25 мкм) – SiO₂ (0,07 мкм). Полученная структура подвергалась длительному (ДТО) (450 °C, 20 мин, N₂) и быстрому (БТО) термическому отжигу (450 °C, 7 с, Ar). Исследование взаимодействия алюминия с поликремнием осуществлялось на сколе пластины с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония) и вторично-ионного масс-спектрометра (ВИМС) TOF.SIMS-5 (IonTof, Германия).

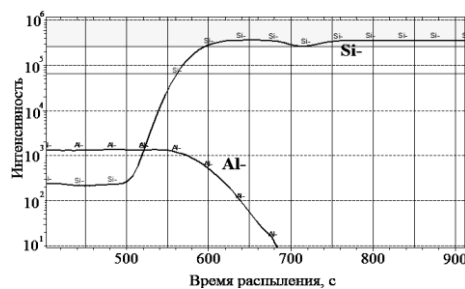
На рисунке 1 приведена структура Al-ПКК-SiO₂ без термического воздействия.

На рисунке 2 приведена структура Al-ПКК-SiO₂ после БТО (450 °C, 7 с, Ar).

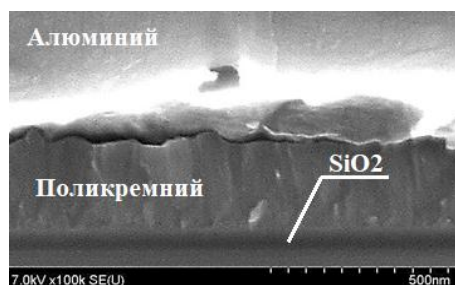
На рисунке 3 приведена структура Al-ПКК-SiO₂ после ДТО (450 °C, 20 мин, N₂).



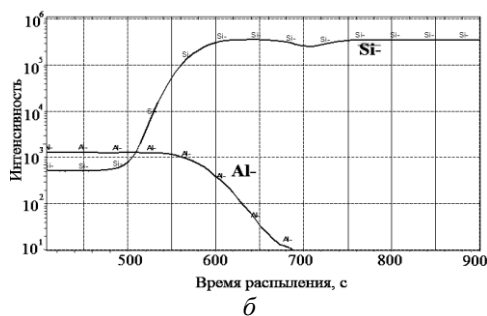
а



б

Рисунок 1 – Исходная структура Al-ПКК-SiO₂ (а) и ВИМС-профиль распределения элементов (б)

а

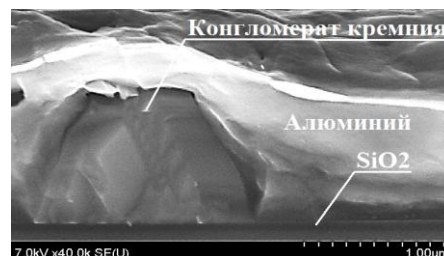


б

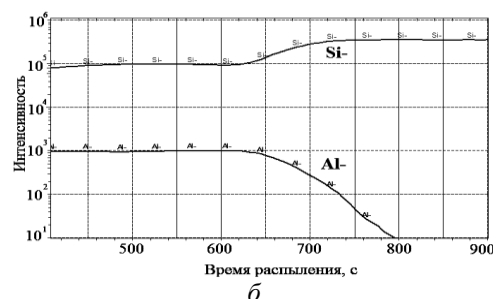
Рисунок 2 – Структура Al-ПКК-SiO₂ (а) и ВИМС-профиль распределения элементов (б) после БТО

Из рисунков 1-3 видно, что после ДТО поликремний полностью растворяется в алюминии с образованием крупных конгломератов кремния (рисунок 3, а). При БТО такого явления не наблюдается. Происходит незначительный рост зерна

поликремния на границе раздела с алюминием (рисунок 2, а). Анализ ВИМС-профилей показал, что после БТО наблюдается небольшое увеличение концентрации кремния в алюминии, что указывает на начало диффузионных процессов на границе раздела алюминий-поликремний (рисунок 2, б) [3]. При увеличении времени отжига (20 мин) поликремний полностью диффундирует в алюминий (рисунок 3, б).



а



б

Рисунок 3 – Структура Al-ПКК-SiO₂ (а) и ВИМС-профиль распределения элементов (б) после ДТО

Заключение. На основе сравнительного анализа результатов исследований ВИМС-профилей и РЭМ-изображений структур Al-ПКК-SiO₂ установлено, что БТО указанных структур приводит к небольшому увеличению концентрации кремния в алюминии вблизи границы раздела Al-ПКК, что является следствием локального протекания диффузионных процессов, в отличие от структур подвергнутых ДТО, где наблюдается практически полное растворение поликремния в алюминии.

Литература

1. Пилипенко, В. А. Быстрые обработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Мн.: Издательский центр БГУ, 2004. – 218 с
2. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии / под ред. А. С. Турцевича. – Мн.: Интегралполиграф, 2013. – 344 с.
3. Количественные методы в масс-спектрометрии / И. Лаваньини [и др.]. – М.: Техносфера, 2008. – 176 с.

УДК 681.3:004.8

ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЧИСЛОВЫХ СИСТЕМ В ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ**Романчак В. М., Прусова И. В.***Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

Аннотация. В работе рассматривается применение принципа относительности в теории измерений. Показано, что численные результаты арифметических операций зависят от выбора числовой системы. Приведен пример двух изоморфных полугрупп, в которых $1 + 1 = 2$ и $1 \oplus 1 = 3$, что демонстрирует относительность численного представления. Предложено использовать инвариантные меры для построения объективных моделей.

Ключевые слова: принцип относительности, теория измерений, инвариантность, числовые системы, изоморфизм

THE PRINCIPLE OF RELATIVITY IN MEASUREMENT THEORY**Romanchak V. M., Prusova I. V***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

Abstract. The paper explores the application of the principle of relativity in measurement theory. It shows that numerical results of arithmetic operations depend on the choice of a number system. An example of two isomorphic semigroups is given, where $1 + 1 = 2$ and $1 \oplus 1 = 3$, demonstrating the relativity of numerical representation. The use of invariant measures is proposed for constructing objective models.

Keywords: principle of relativity, measurement theory, invariance, number systems, isomorphism.

*Адрес для переписки: Романчак В. М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Romanccchak@bntu.by*

Целью данной работы является популярное изложение одного из фундаментальных принципов науки – так называемого принципа относительности. Этот принцип хорошо известен в физике и был впервые сформулирован еще Галилео Галилеем в XVII веке.

Принцип относительности утверждает, что законы природы одинаковы для всех наблюдателей, независимо от их точки зрения. Один и тот же физический процесс может описываться по-разному в зависимости от того, как движется наблюдатель, но ни одна точка зрения не является «главной» или «абсолютной». Это стало основой классической механики и позже развито в специальной теории относительности Эйнштейна.

Но значение этого принципа выходит за рамки физики. Его можно применить и к теории измерений. Например, температуру можно измерять в градусах Цельсия, Кельвина или Фаренгейта, длину – в метрах, футах или световых годах. При этом ни одна из этих шкал не лучше другой – все они равноправны. И именно это свойство – инвариантность, то есть неизменность законов при переходе между шкалами – делает научные данные объективными.

Равенство «один плюс один равно два» кажется нам само собой разумеющимся. Однако если подойти к этому строго с точки зрения логики и оснований математики, оказывается, что даже такое простое утверждение требует обоснования.

Исторически одной из первых попыток дать формальное доказательство арифметическим фактам предприняли Бертран Рассел и Альфред Уайтхед в своем трехтомном труде «Principia Mathematica» (1910–1913). Их цель была показать, что вся математика может быть выведена из минимального набора логических

аксиом – без использования интуитивных представлений.

Они дали первое строгое доказательство того, что «один плюс один равно два». Примечательно, что чтобы прийти к этому результату, потребовалось 370 страниц формальных рассуждений, начиная с самых базовых понятий.

В современной математике натуральные числа строятся в рамках аксиоматической теории множеств, а именно системы Zermelo–Fraenkel с аксиомой выбора (ZFC). В этой системе каждое число определяется как конкретное множество:

- ноль – это пустое множество,
- единица – это множество, содержащее ноль,
- двойка – это множество, содержащее ноль и единицу, и так далее.

Сложение определяется рекурсивно: любое число плюс ноль – это само число, – сложение с последующим числом определяется через операцию перехода к следующему числу. Таким образом, равенство «один плюс один равно два» становится строго доказываемым фактом в рамках современной математики. Мощность множества – это обобщение идеи количества элементов. Два множества считаются равносильными, если между ними можно установить взаимно однозначное соответствие. Например, если у нас есть два яблока, мы можем сказать: одно яблоко плюс одно яблоко равно двум яблокам. Но возникает вопрос: всегда ли применима эта арифметика к реальным объектам?

Рассмотрим множество целых неотрицательных чисел: 0, 1, 2, 3 и так далее. На этом множестве можно определить две различные операции сложения: обычное сложение (+), новую операцию $\oplus$, зависящую от некоторого целого числа $k \leq 0$. Эта новая операция задается так:

$$m \oplus n = m + n - k.$$

Рассмотрим эти две алгебраические структуры, построенные на одном и том же множестве – множестве целых неотрицательных чисел: 0, 1, 2, 3 и так далее.

Первая структура: обычная операция сложения. Если взять любые два числа из этого множества и сложить их между собой, то результат также будет принадлежать этому множеству. Например:

$$1 + 1 = 2.$$

Это означает, что операция сложения замкнута на данном множестве – при сложении не возникает чисел вне этого набора.

Кроме того, сложение обладает важным свойством – ассоциативностью. Это значит, что если мы складываем три числа подряд, то порядок выполнения операций не влияет на результат:

$$(a + b) + c = a + (b + c).$$

Такая структура – множество с ассоциативной операцией – называется полугруппой. В данном случае это полугруппа неотрицательных целых чисел относительно обычного сложения. Теперь рассмотрим вторую операцию, которую мы обозначили как $\oplus$. Эта операция зависит от выбранного нами числа k , которое меньше или равно нулю. Определим ее следующим образом: для любых двух чисел m и n , результат операции $m \oplus n$ равен сумме m и n плюс число, противоположное числу k . Если выбрать конкретное значение $k = -1$, то эта операция упрощается до правила:

$$m \oplus n = m + n + 1$$

Пример: $1 \oplus 1 = 1 + 1 + 1 = 3$.

Можно проверить, что результат применения этой операции всегда остается в пределах исходного множества – неотрицательных целых чисел. То есть операция $\oplus$ тоже замкнута на этом множестве. Кроме того, она также ассоциативна, как и обычное сложение.

Поэтому и эта структура является полугруппой.

Хотя численные значения в этих двух полугруппах различаются (например, $1 + 1 = 2$, а $1 \oplus 1 = 3$), внутренняя структура этих двух систем оказывается одинаковой.

Существует особое соответствие между элементами этих полугрупп (изоморфизм) – такое преобразование, которое позволяет перейти от одной операции к другой, сохраняя все алгебраические свойства. Это соответствие задается функцией $f(x) = x + k$, где k – это то самое число, используемое при определении операции $\oplus$. В этом случае говорят, что эти две полугруппы изоморфны, то есть они имеют одинаковую внутреннюю алгебраическую структуру несмотря на то, что численные результаты операций в них различаются. Например, в одной системе выполняется равенство $1 + 1 = 2$, а в другой $1 \oplus 1 = 3$. Однако оба результата «сложения» являются корректными и значимыми в рамках своих систем.

Хотя структура остается та же, численные значения могут меняться в зависимости от выбора системы. Это нарушает принцип относительности, потому что результаты измерений становятся зависимыми от способа кодирования. Поэтому предлагается использовать относительные меры, например, разности или приращения. Вместо того чтобы говорить, что объект имеет размер «два», лучше выражать его как «изменение от нуля до двух». Такие величины остаются неизменными при допустимых преобразованиях шкал. Пример:

$$1 + 1 = (1 - 0) + (2 - 1) = 2 - 0$$

Такой подход позволяет выделить объективные характеристики модели, которые не зависят от выбора числовой системы.

Заключение. Равенство «один плюс один равно два» кажется очевидным, но его смысл зависит от контекста. Оно строго доказывается в рамках современной математики, но численный результат может меняться в зависимости от системы отсчета. Этот пример подчеркивает важность построения инвариантных моделей. Такой подход делает научные измерения более объективными и универсальными.

Литература

1. Luce, R. D. A note on Boolean subjective ordering of events and additive symbolic probability / R. Duncan Luce // Journal of Mathematical Psychology. – 1978. – Vol. 17, № 2. – P. 124–134.
2. Roberts, F. S. Measurement Theory with Applications to Decisionmaking, Utility, and the Social Sciences / Fred S. Roberts. – Philadelphia: SIAM, 2009. – 458 p.

УДК 535.37; 520.35

СПЕКТРОФЛУОРИМЕТР ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Самцов М. П.¹, Тарасов Д. С.^{1,2}, Радько А. Е.¹, Шевченко К. А.¹, Кирсанов А. А.¹, Лабода Н. В.¹, Воропай Е. С.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Савченко БГУ

²Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Разработан и изготовлен экспериментальный образец спектрофлуориметра для регистрации спектрально-кинетических параметров люминесценции. Прибор разрабатывался в рамках подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование». Наряду с измерением времен высвечивания в диапазоне 0,2–10 000 нс предусмотрена

регистрация стационарных спектров флуоресценции. Для определения времен затухания использован метод время-коррелированного счета одиночных фотонов. Возбуждение флуоресценции осуществлялось с помощью набора импульсных светодиодных и лазерных источников. На все узлы и спектрофлуориметр разработана конструкторская документация и программное обеспечение для управления измерениями и обработки результатов измерений.

Ключевые слова: спектрально-кинетический люминесцентный анализ, длительность затухания флуоресценции, время-коррелированный счет одиночных фотонов, лазерные диоды, органические красители.

SPECTROFLUORIMETER FOR LUMINESCENT KINETIC ANALYSIS

Samtsov M. P.¹, Tarasau D. S.^{1,2}, Radzko A. E.¹,
Shevchenko K. A.¹, Kirsanov A. A.², Laboda N. V.¹, Voropay E. S.²

¹A. N Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of BSU

²Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. An experimental prototype of a spectrofluorimeter for recording the spectral-kinetic parameters of luminescence was developed and manufactured. The device was developed under the "Scientific and Educational Equipment" subprogram of the "National Standards and High-Tech Research Equipment" State Scientific and Technical Program. In addition to measuring decay times in the range of 0.2–10 000 ns, it also records steady-state fluorescence spectra. A time-correlated single-photon counting method was used to determine decay times. Fluorescence was excited using a set of pulsed LED and laser sources. Design documentation and software for measurement management and data processing were developed for all components and the spectrofluorimeter.

Keywords: spectrofluorimeter, spectral-kinetic luminescence analysis, fluorescence decay time, time-correlated single photon counting, organic dyes.

Адрес для переписки: Самцов М. П., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь

e-mail: samtsov@mail.ru

Люминесцентный анализ – чувствительный метод, который широко применяется в различных отраслях науки. Широкое применение он находит при изучении сложных молекулярных структур и биологических объектов. Следует отметить, что именно измерение кинетических параметров люминесцентного свечения позволяет получить наиболее обширную и точную информацию при проведении диагностики биообъектов *«in vivo»* и *«in vitro»*. В последнее время для диагностики биообъектов очень активно применяется и развивается метод флуоресцентных зондов. В этом качестве применяются препараты на основе различных сложных молекул. Суть метода сводится к тому, что спектральные параметры флуоресцентного зонда в области здоровой и патологической биоткани различаются, что обусловлено изменением окружения флуоресцентного зонда. Их спектры как правило широкополосные, поэтому при анализе только стационарных спектров не обеспечивается высокая точность. Существенно лучшая достоверность достигается при регистрации кинетических параметров высвечивания. Это обеспечивается посредством применения импульсных спектрофлуориметров. Принцип работы подобных приборов описан в монографиях [1-2]. Такого рода оборудование серийно производится уже более двух десятков лет. Одни из первых моделей (Edinburg Instruments Inc., Шотландия, модель 199; Photochemical Research Associates Inc., Канада, модель PRA 4000) имели в качестве источников возбуждения газоразрядные лампы с импульсами наносекундной длительности. Подобный прибор был разработан учеными БГУ и НИИПФП и совместно с предприятием ОПТРОН выпущен в виде малой серии [3], в нем возбуждение осуществлялось газоразрядной импульсной лампой

с управляемой частотой следования импульсами наносекундной длительности [4]. Существенным отличием производимых приборов в настоящее время является использование для возбуждения лазерных источников с субнаносекундной длительностью возбуждающих импульсов. Как правило они отличаются высокой частотой следования импульсов, что при использовании метода коррелированного счета фотонов обеспечивает сокращение времени регистрации и повышение точности измерений. Для эксплуатации и обслуживания подобного оборудования необходимы специалисты высокой квалификации, в связи с чем проблематично их использование в учебных целях. В данной работе представлены описание и характеристики разработанного и созданного в НИИ ПФП и БГУ лазерного спектрофлуориметра для научно-учебных целей [4].

Описание структуры и принципа работы лазерного спектрофлуориметра. При разработке лазерного спектрофлуориметра предусматривалась возможность проведения широкого круга задач спектрально-кинетического люминесцентного анализа. Наряду с регистрацией кинетики затухания флуоресценции образцов при возбуждении импульсным источником света спектрофлуориметр позволяет регистрировать стационарный спектр флуоресценции. Измерение кинетики затухания флуоресценции проводилось по методу время-коррелированного счета одиночных фотонов.

Принципиальная схема спектрофлуориметра состоит из трех функционально законченных частей: оптико-механического блока, электронного блока и персональной электронно-вычислительной машины для выполнения специального программного обеспечения по управлению

спектрофлуориметром и анализу кинетики затухания флуоресценции. В спектрометре использованы несколько лазерных и светодиодных источников света. Параметры импульсных лазерных источников описаны в работе [5]. Комбинацией лазерных и светодиодных источников позволяет осуществлять возбуждение флуоресценции в спектральном диапазоне 250–760 нм.

Разработано программное обеспечение (ПО) для объединения отдельных узлов в единый программно-аппаратный комплекс. ПО спектрофлуориметра позволяет организовать управление электронным блоком и монохроматором-спектрографом M150, что обеспечивает высокую степень автоматизации при регистрации и обработке кинетики затухания и стационарных спектров флуоресценции. В ПО спектрофлуориметра использован разработанный программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции. В его основе аппроксимация экспериментальных данных с использованием нелинейного метода наименьших квадратов.

Временное разрешение импульсного спектрофлуориметра зависит от параметров возбуждающих импульсов (длительности и стабильности), а также от параметров фотоприемников и системы регистрации. В реальных измерениях временная разрешающая способность импульсного спектрофлуориметра определяется наименьшим значением измеряемой длительности затухания и минимальной достоверно измеряемой разностью длительности затухания флуоресценции.

Для определения данных параметров используют методы, основанные на измерениях параметров кинетики эталонных образцов [6]. Принимая во внимание, что с помощью разработанного спектрофлуориметра с приемлемой точностью

(10 %) определена длительность затухания флуоресценции эритрозина-Б в этаноле, для которого этот параметр составляет $0,089 \pm 0,003$ нс [6], то установленное значение можно принять в качестве нижней границы диапазона измеряемых времен затухания, а также в качестве оценки временного разрешения.

Заключение. Разработан лазерный спектрофлуориметр для спектрально-кинетического люминесцентного анализа, который позволяет регистрировать кинетику затухания флуоресценции и стационарный спектр флуоресценции. Разработанный прибор имеет высокую степень автоматизации и обеспечивает возможность измерения длительности затухания флуоресценции в диапазоне от 0,1 нс до 10 мкс с временным разрешением менее 0,1 нс.

Литература

1. O'Connor, D. Time-correlated single photon counting / D. O'Connor. – London: Academic press, 1984. – 298 p.
2. Becker, W. Advanced time-correlated single photon counting techniques / W. Becker. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. – 642 p.
3. Импульсный спектрофлуориметр наносекундного диапазона / Е. С. Воропай [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2002. – № 3. – С. 7–13.
4. Спектрофлуориметр для кинетического спектрального анализа / М. П. Самцов, Д. С. Тарасов, А. Е. Радько [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т. 92, № 5. – С. 640–649.
5. Compact Picosecond Diode Lasers / E. S. Voropay, A. E. Rad'ko, M. P. Samtsov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – 65, № 1. – P. 83–88.
6. Fluorescence lifetime standards for time and frequency domain fluorescence spectroscopy / N. Boens, V. Hofkens, M. Ameloot [et al.] // Analytical chemistry. – 2007. – Vol. 79, № 5. – P. 2137–2149.

УДК 666.01

ХИМИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ Сергиевич О. А.¹, Колонтаева Т. В.², Станчук А. А.¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Разработаны опытные составы керамических материалов на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$, которые могут быть использованы для получения электролитических ключей различных типов электродов. Исследованы зависимости основных физико-химических свойств синтезированных материалов от исходного состава и температурной обработки, а также их термическая устойчивость.

Ключевые слова: электрод, температурный коэффициент линейного расширения, химическая устойчивость, фазовый состав, микроструктура.

CHEMICALLY STABLE CERAMIC MATERIALS BASED ON THE $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ SYSTEM Sergievich O. A.¹, Kolontaeva T. V.², Stanchuk A. A.¹

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Experimental compositions of ceramic materials based on the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ system have been developed, which can be used to obtain electrolytic keys for various types of electrodes. The dependences of the main physicochemical properties of the synthesized materials on the initial composition and temperature treatment, as well as their thermal stability, have been studied.

Keywords: electrode, coefficient of linear thermal expansion, chemical resistance, phase composition, microstructure.

*Адрес для переписки: Сергеевич О. А., ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: Topochka.83@mail.ru*

Введение. Разработка и синтез проницаемых керамических материалов, используемых для изготовления электролитических ключей, является перспективным и актуальным направлением исследования в области материаловедения. Они относятся к электрохимическим ячейкам, представляющим собой границу раздела фаз между различными типами электролитов. Через электролитический ключ вспомогательного электрода осуществляется его связь с анализируемым раствором. На электролитическом ключе возникает диффузионный потенциал. Величина данного потенциала зависит от скорости движения раствора электролита и для корректной работы электрода должна быть величиной постоянной.

К материалам для электролитических ключей предъявляют определенные требования, так как при производстве электровакуумное стекло сплавляется с ключом.

Определяющие тепловые свойства керамики должны обеспечивать качественный спай в месте контакта электролитического ключа с электровакуумным стеклом, не допускаются дефекты [1]. Основным контролируемым свойством является температурный коэффициент линейного расширения, он должен быть более $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Механические свойства также нормируются: механическая прочность (не менее 3 МПа), размер пор (в пределах 1–5 мкм). Поры должны быть распределены равномерно по всему объему материала. На границе растворов электросопротивление ключа не должно превышать 10–15 кОм.

Получение керамических материалов, обеспечивающих достаточную прочность сцепления со стеклообразным материалом, высокую стойкость (химическую и термическую) и соответствующих указанным требованиям, предлагается проводить на основе синтеза высокорасширяющихся кристаллических фаз. Именно такие структуры обеспечивают стойкость к агрессивным фторсодержащим средам

В данной научной работе в качестве основы для синтеза керамики выбрана двухкомпонентная оксидная система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$. Используемый комплекс сырьевых материалов после определенной термообработки позволит синтезировать необходимые кристаллические фазы – крестобалит с небольшим содержанием кварца и муллита. Химический состав опытных композиций будет способствовать их повышенной химической устойчивости в кислых средах [2].

На основании представленного обзора установлена цель данной работы, заключающаяся в разработке составов керамических материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств и фазово-структурных характеристик. Разработанные материалы могут быть использованы для получения электролитических ключей различных типов электродов.

Методическая часть. В качестве исходных сырьевых материалов для подготовки шихты использовалось кремнеземистое сырье: кварцевый песок (ГОСТ 22551–2019), кремнегель (ГОСТ 3956–76), аморфный кремнезем (ГОСТ 31735–2012) и небогатенный каолин. Для пластификации и активизации спекания вводились глиносодержащие компоненты: огнеупорная глина (ГОСТ 3226–93) и бентонит (ГОСТ 28177–89).

Исходные сырьевые материалы измельчали в микрошаровой мельнице методом мокрого помола (до остатка на сите № 0063 не более 2–3 %), смешивали и увлажняли (влажность 35 ± 5 %). Сушку производили до достижения 1–2 % влажности и измельчали в ступке до порошкообразного состояния.

Для синтеза опытных образцов использовали технологию полусухого прессования.

Готовый пресс-порошок после вылеживания в течение 24 часов подвергался прессованию при давлении 1,5–2 МПа на гидравлическом прессе. Образцы имели вид штабиков (длина 5 мм и диаметр $1 \pm 0,2$ мм). После сушки до влажности не более 0,5 % образцы подвергались спеканию в электрической печи. Спекание проводилось при разных температурах (1150, 1200, 1250 и 1300 °C) с выдержкой при максимальной температуре 1ч.

Экспериментальная часть. У опытных образцов определяли водопоглощение, которое характеризуется наличием открытых пор. В зависимости от состава масс и температурной обработки оно изменяется в широких пределах (8,3–81,5 %). Максимальные значения водопоглощения наблюдаются у образцов, которые содержат – небогатенный каолин (20,7 %) и кремнезем (76,3 %). Образцы, содержащие огнеупорную глину (42,5 %) и кварцевый песок (65,5 %), характеризуются низким водопоглощением.

Процессы массопереноса активизируются при повышении температуры, что вызывает увеличение доли расплава в системе и снижение вязкости. В результате уплотняется структура, повышается кажущаяся плотность, снижается пористость и, соответственно, водопоглощение.

Синтезированные образцы, содержащие большое количество аморфного кремнезема, небогатенный каолин и кремнегель, не могут обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики из-за высокой дисперсности аморфных кремнеземистых материалов и высокой их кристаллизационной способностью. Образцы, содержащие в значительном количестве глинистые составляющие (свыше 40 %) в сочетании с кристаллическим кварцем обладают требуемыми показателями физико-механических свойств (механической прочностью при изгибе – более 2 МПа, открытой пористостью – 25–40 %, водопоглощением – 10–18 %). Роль корректирующей добавки могут выполнять аморфные компоненты SiO_2 . В результате исследования определена оптимальная температура спекания 1250 °С. Варьируя температуру в небольших пределах можно управлять физико-механическими свойствами опытных образцов.

Таблица 1 – Физико-механические свойства

Наименование показателя	Значения
Температура обжига, °С	1250±10
Водопоглощение, %	13,6
Открытая пористость, %	25,4
ТКЛР при 400 °С, $\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$	9,37
Удельное объемное сопротивление при 100 °С, Ом·м	$5 \cdot 10^{11}$
Механическая прочность, МПа	31,0
Химическая стойкость, %	98,7

Наряду с вышеуказанными свойствами необходимо исследовать термическую устойчивость опытных образцов. Определение ТКЛР образцов при температуре синтеза 1250 °С производилось в температурном интервале 50–400 °С.

Наличие полиморфного превращения, а именно переход кристобалита из низкотемпературной β -формы в высокотемпературную α -форму,

у образцов с кварцевой добавкой и кремнегелем, отображается на кривой зависимости ТКЛР в виде скачка. Не наблюдается скачкообразных изменений ТКЛР в образцах с аморфизированным кварцем.

Интервал значений ТКЛР образцов изменяется в пределах от $4,74 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до $15,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Оптимальным по ТКЛР ($8,95 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) выбран образец, содержащий глину, кварцевый песок и кремнегель.

Усредненные значения показателей физико-механических свойств опытных образцов оптимального состава приведены в таблице 1.

Структурно-фазовый анализ образцов оптимального состава показывает наличие таких кристаллических фаз в его составе, как кристобалит, муллит, α - и β - формы кварца. Микроскопическим исследованием установлена однородная, мелкопористая структура материала с наличием кристаллов кварца размерами 2–8 мкм и равномерным распределением пор размерами 2–3 мкм.

Выводы. Таким образом, сочетание огнеупорной глины, кристаллического кварца и аморфного кремнезема при оптимальной температуре синтеза позволяет получить химически устойчивый керамический алюмосиликатный материал, синтезированный в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$. Разработанные составы могут быть использованы в качестве электролитических ключей в различных типах электродов.

Литература

1. Васильев, В. П. Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа: учеб. для студентов вузов, обуч. по хим. технол. спец.: в 2 кн. / В. П. Васильев. – 4-е изд. – М.: Дрофа, 2004. – Кн. 2. – 383 с.
2. Основы технической керамики: учеб. пособие / Н. Ю. Черкасова, В. С. Веселов, Д. В. Дудина [и др.]. – Новосибирск: НГТУ, 2023. – 106 с.

УДК 629 018

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЦЕЛЯХ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКТА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМС В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ И ПИТАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Таболіч Т. Г., Петровіч А. Г.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки генератора испытательных импульсов для создания комплекта контрольной и измерительной аппаратуры, предназначенного для оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) в цепях управления и питания транспортных средств. Представлены методы проектирования и реализации генератора, а также анализ его характеристик и возможностей применения в условиях испытаний транспортной техники. Работа направлена на повышение точности и надежности измерений, что способствует обеспечению соответствия транспортных средств требованиям стандартов ЭМС.
Ключевые слова: генератор испытательных импульсов, оценка электромагнитной совместимости в цепях управления и электропитания транспортных средств, испытания транспортного оборудования.

DEVELOPMENT OF A TEST PULSE GENERATOR IN ORDER TO CREATE A SET OF CONTROL AND MEASURING EQUIPMENT FOR THE ASSESSMENT OF EMC IN VEHICLE CONTROL AND POWER SUPPLY CIRCUITS

Tabolich T. G., Petrovich A. G.

Open Joint-Stock Company "MNIPI", Minsk, Belarus

Abstract. The article discusses the development of a test pulse generator to create a set of control and measuring equipment designed to assess electromagnetic compatibility (EMC) in vehicle control and power supply circuits. The methods of designing and implementing a generator are presented, as well as an analysis of its characteristics and application possibilities in the conditions of testing transport equipment. The work is aimed at improving the accuracy and reliability of measurements, which helps ensure that vehicles comply with the requirements of EMC standards.

Keywords: generator of test pulses, assessment of electromagnetic compatibility in control and power supply circuits of vehicles, testing of transport equipment.

Адрес для переписки: Таболич Т. Г., ул. Якуба Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnipi@mnipi.by

Повышение качества и конкурентоспособности автотранспортных средств с учетом широкого внедрения электронного управления всеми ключевыми узлами и агрегатами невозможно осуществить без испытаний электронных компонентов на устойчивость к помехам в цепях управления и питания транспортных средств. На сегодняшний день испытания на ЭМС являются наиболее достоверным способом подтвердить способность технических средств функционировать в реальных условиях эксплуатации при воздействии на них электромагнитных помех и не создавать недопустимых помех другим техническим средствам.

Испытание на ЭМС в сертифицированных лабораториях не является дешевым или доступным даже при однократном его прохождении. Устранения несоответствий и выявленных неисправностей после доработки изделия может потребовать дополнительных затрат и времени на повторные испытания.

В этой связи важно выявить как можно раньше несоответствие стандартам по электромагнитной совместимости разрабатываемого устройства. Внедрение в технологический процесс разработки разработанного тестового оборудования позволит выполнить предварительное тестирование на соответствие стандартам ЭМС разработчиком электронных средств, выбрать оптимальные решения для устранения выявленных неисправностей, и уменьшить расходы и сроки выпуска оборудования.

Основная часть. В целях актуализации работ и усовершенствованию контрольно-измерительной аппаратуры для оценки ЭМС в цепях управления и питания транспортных средств в ОАО «МНИПИ» выполняется опытно-конструкторская работа «Разработка комплекта контрольно-измерительной аппаратуры для оценки ЭМС в цепях управления и питания транспортных средств специального и двойного назначения». Целью работы является разработка комплекта испытательной аппаратуры для проведения испытаний электрооборудования автомобилей на соответствие требованиям международных стандартов ЭМС к помехам в цепях управления и питания транспортных средств специального и двойного назначения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- определить требования к параметрам имитирующих импульсов для испытания современных

систем управления силовыми установками автоматизированных транспортных средств;

- разработать архитектурные и схемные решения имитаторов помех, позволяющие использовать их в виде автономных приборов, а также в составе автоматизированной системы;

- разработать комплект конструкторской документации, а также изготовить опытные образцы имитаторов импульсных помех.

Поставленные задачи успешно решены путем разработки комплекта контрольно-измерительной аппаратуры для оценки ЭМС в цепях управления и питания транспортных средств специального и двойного назначения в состав которого вошли следующие приборы:

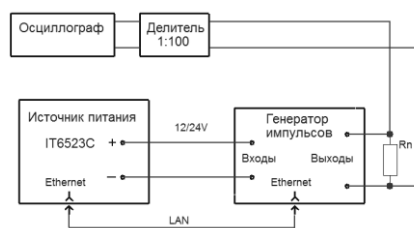


Рисунок 1 – Схема подключения приборов для проверки характеристик импульса 1, 2а, 3а, 3б

Проверку формирования генератором испытательных импульсов 2б, 4, 5а, 5б на соответствие с требований стандартов ГОСТ ISO 7637-2-2015, ISO 16750-2 проводят по схеме, приведенной на рисунке 2.

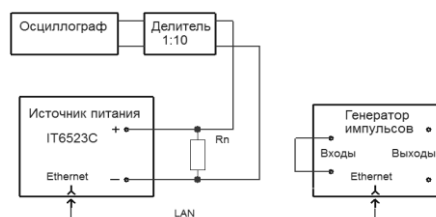


Рисунок 2 – Схема подключения приборов для проверки характеристик импульса 2б, 4, 5а, 5б

Осциллограф цифровой используемый для визуального наблюдения за изменениями электрических сигналов в цепях управления и питания, имеющий два канала и обладающий следующими основными характеристиками: диапазон частот 0–200 МГц; частота дискретизации – 400 МГц; чувствительность 2 мВ – 500 В/дел, (с внешним делителем 1:100).

Программируемый источник питания такими основными характеристиками: выходное напряжение 0–200 В; выходной ток 0–60 А; выходное сопротивление 0–13 Ом; функции формирования импульсов согласно требованиям ISO 16750-2, SAEJ1113-11, DIN40839.

Генератор испытательных импульсов, формирующий импульсы – 1, 2а, 3а, 3б, разработанный в соответствии с требованиями ГОСТ 7637-2-2015 [1], обладающий следующими характеристиками: сеть питания тестируемого устройства – 12, 24 В; максимальный ток потребления тестируемого устройства – 50 А; в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 7637-2-2015. Проверку формирования генератором испытательных импульсов 1,2а,3а,3б на соответствие с требований стандарта ГОСТ ISO 7637-2-2015 проводят по схеме, приведенной на рисунке 1.

Особенностью разработанного комплекта контрольно-измерительной аппаратуры для оценки ЭМС в цепях управления и питания транспортных средств специального и двойного назначения является малые габариты в сравнении с аналогичным, оборудованием, производимым в ближнем зарубежье, более низкая цена, возможность формировать импульсные сигналы 1, 2а, 3а, 3б в соответствии с требованиями последних редакций международных стандартов ЭМС как для транспортных средств с питанием 12 В так и 24 В.

Заключение. Создание комплекта контрольно-измерительной аппаратуры для оценки

электромагнитной совместимости в цепях управления и питания транспортных средств специального и двойного назначения – важная задача для обеспечения надежности и безопасности работы современных автомобилей и техники. Современные технологии позволят разрабатывать эффективные решения, которые помогут свести к минимуму влияние электромагнитных помех на работу электронных систем, что в свою очередь повысит уровень безопасности и эксплуатационных характеристик транспортных средств.

Оценка электромагнитной совместимости в цепях управления и питания транспортных средств является важным шагом для обеспечения их надежной работы в условиях воздействия электромагнитных помех. Стандартизация тестов, применение современных приборов и методик позволяют обеспечить высокое качество и безопасность транспортных средств, что особенно критично для машин специального назначения, а комплексный подход к оценке ЭМС и применение наилучших практик в разработке этих систем позволит минимизировать риски неисправностей и увеличить срок службы оборудования.

Литература

1. ГОСТ ISO 7637-2-2015. Транспорт дорожный. Помехи кондуктивные, емкостные и индуктивные. Часть 2. – Введ. 01.07.2016. – М.: Стандартинформ, 2015. – 45 с.

УДК 621.793.184

НОВЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА

Телеш Е. В.¹, Сафронов Н. В.², Перепечко Е. Ю.¹, Курбако Е. Г.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Минск, Беларусь

Аннотация. Разработан новый метод формирования покрытий из диоксида титана прямым осаждением из ионного пучка. Исследовано влияние парциального давления кислорода на характеристики покрытий. Установлено, что увеличение давления кислорода приводило к росту оптического пропускания, коэффициента преломления и износостойкости покрытий.

Ключевые слова: покрытия из диоксида титана, прямое осаждение из ионного пучка, давление кислорода, оптические характеристики, коэффициент преломления, коэффициент трения

A NEW METHOD FOR SYNTHESIS OF TITANIUM DIOXIDE COATINGS

Telesh E. V.¹, Safronov N. V.², Perepechko E. Y.¹, Kurbako E. G.¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²OJSC Minsk Research Institute of Radiomaterials

Minsk, Belarus

Abstract. A new method for forming titanium dioxide coatings by direct ion beam deposition was developed. The effect of oxygen partial pressure on the coating properties was studied. It was found that increasing oxygen pressure resulted in increased optical transmittance, refractive index, and wear resistance of the coatings.

Keywords: titanium dioxide coatings, direct ion beam deposition, oxygen pressure, optical properties, refractive index, coefficient of friction.

Адрес для переписки: Телеш Е. В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: eteleash@bsuir.by

Диоксид титана (TiO₂) является одним из перспективных материалов среди прозрачных оксидов. Тонкие пленки TiO₂ широко используют

в разных фотоэлектрических приборах благодаря их высокой прозрачности в видимой области длин волн и электрическим свойствам, которые изме

няются в широких пределах в зависимости от технологических условий [1]. Значительный интерес к исследованию свойств тонких пленок диоксида титана обусловлен возможностью их использования в высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементах и информационно-измерительных приборах. Для изготовления тонких пленок TiO_2 используют ряд технологических методов: реактивное магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение, осаждение из газовой фазы, пульверизация с последующим пиролизом, термическое окисление и т. п. [2].

Нами предложен новый метод синтеза пленок диоксида титана – прямое осаждение из ионных пучков, формируемых ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса [3]. Ионный источник 1 включал в себя соленоид 2, анод 3, дополнительный магнит 4, диафрагму из титана 5. Первичные пучки ионов аргона и кислорода 6 при наличии магнитных полей генерировали вторичный ионный пучок 7, который конденсировался на подложке 8 (рисунок 1).

Покрывают наносили на подложки из стекла и кремния. Остаточный вакуум составлял $(3,0\text{--}4,7) \cdot 10^{-3}$ Па, давление рабочего газа (аргон и кислород) – $(3,2\text{--}4,3) \cdot 10^{-2}$ Па. Мощность пучка варьировалась в диапазоне 110–130 Вт, напряжение U_d на диафрагме отсутствовало. Температура подложек составляла 313–323 К.

Измерение оптического пропускания покрытий осуществлялось в диапазоне 350–900 нм с помощью спектрофотометра PROSCAN. На рисунке 2 приведен спектр пропускания покрытия, полученного при парциальном давлении кислорода $\sim 2,1 \cdot 10^{-2}$ Па.

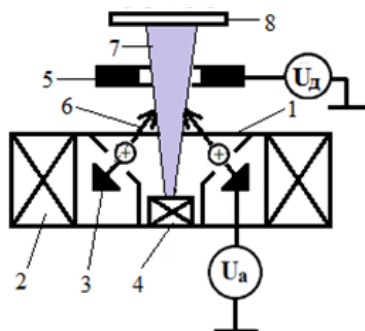


Рисунок 1 – Схема прямого осаждения пленок TiO_2

Установлено, что увеличение парциального давления кислорода способствовало росту оптического пропускания на $\lambda = 555$ нм (рисунок 3) и коэффициента преломления (рисунок 4). Последний измерялся на эллипсометре ЛФ-3. Следовательно имело место значительное окисление титана даже при невысоких давлениях кислорода.

Трибологические характеристики измерялись с использованием микротвердомера МТ-4. Рост давления кислорода привел к снижению коэффициента трения k с 0,65 до 0,36, что можно объяснить увеличением микротвердости по сравнению

с чистым титаном. Микроструктура покрытий исследовалась с применением атомно-силового микроскопа Ntegra Prima. На рисунке 5 приведено АСМ-изображение поверхности пленки TiO_2 на подложке из кремния, полученной при давлении кислорода $2,1 \cdot 10^{-2}$ Па. Покрытие имело очень плотную микроструктуру – средняя шероховатость составила всего лишь 0,867 нм.

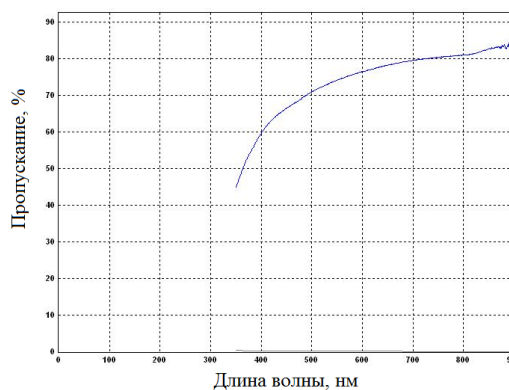


Рисунок 2 – Спектр пропускания пленок диоксида титана при парциальном давлении кислорода $2,1 \cdot 10^{-2}$ Па

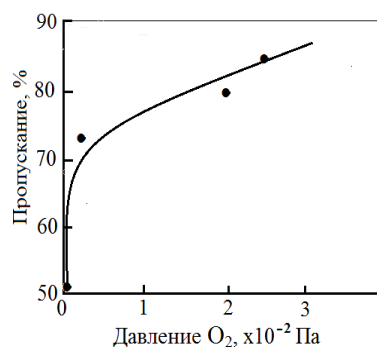


Рисунок 3 – Зависимость пропускания на $\lambda = 555$ нм от парциального давления кислорода

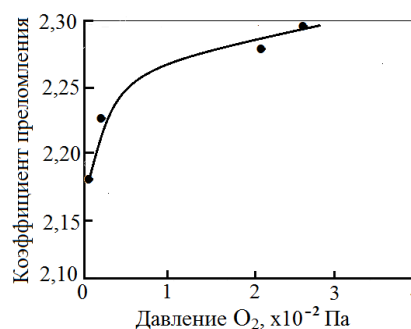


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента преломления от давления кислорода

Измерение адгезии покрытий методом отрыва липкой ленты показало, что покрытия нанесенные на стеклянные подложки успешно прошли тесты во всем диапазоне давлений кислорода. При нанесении покрытий на кремниевые подложки имело место растрескивание пленки из-за высоких механических напряжений, т. к. температура конденсации была низкой.

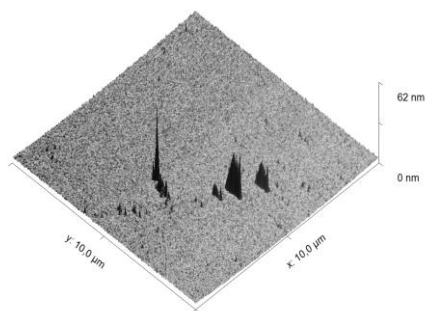


Рисунок 5 – Микроструктура покрытия из диоксида титана

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанный метод синтеза пленок

TiO_2 позволяет получать качественные покрытия в высокими прозрачностью, плотностью и износостойкостью даже при низких температурах подложки.

Литература

1. Enhancing the photoelectrochemical properties of titanium dioxide by thermal treatment in oxygen deficient environment / A. P. Singh, N. Kodan, B. R. Mehta // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 372. – P. 63–69.
2. Reactive sputtering deposition of photocatalytic TiO_2 thin films on glass substrates / C. J. Tavares, J. P. Leitao, J. A. Sans [et al.] // *Journal of Materials Science and Engineering B*. – 2007. – Vol. 138. – P. 139–143.
3. Ионно-плазменные системы в технологии тонких пленок / А. П. Достанко, С. И. Мадвейко, Е. В. Телеш [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2024. – № 2. – С. 20–31.

УДК 621.315.592

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА

Францкевич А. В., Францкевич Н. В., Мартинович В. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Пластины монокристаллического р-типа 10 Ωcm Cz-Si обрабатывались в DC плазме водорода при разности потенциалов 1, 2,5 и 5 кэВ. Температура во время обработки составляла 250 и 400 $^{\circ}\text{C}$. Длительность обработки 60 и 120 минут. В результате проведенных обработок в приповерхностном слое кремния формируется дефектный слой, испытывающий сжимающие напряжения. В зависимости от условий плазменной обработки в данном слое возможно накопление молекулярного водорода.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, дефекты в кремнии, водородная плазма.

SURFACE MODIFICATION OF SILICON WAFERS BY HYDROGEN DC PLASMA TREATMENT Frantskevich A. V., Frantskevich N. V., Martinovich V. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Wafers of single-crystal p-type 10 Ωcm cm Cz-Si were treatment in DC hydrogen plasma at potential differences of 1, 2.5 and 5 keV. The temperature during processing was 250 and 400 $^{\circ}\text{C}$. The duration of processing was 60 and 120 minutes. As a result of the processing, a defective layer is formed in the near-surface silicon layer, which experiences compressive stresses. Depending on the plasma processing conditions, molecular hydrogen may accumulate in this layer.

Keywords: raman scattering, defects in silicon, hydrogen plasma.

Адрес для переписки: Францкевич А. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: n_frantskevich@bntu.by

Введение. Гидрогенизация или обработка в плазме водорода разного типа, широко используется в технологии производства солнечных элементов, светодиодов, элементов памяти и других микроэлектронных структур на основе кремния. Основная цель данных обработок - улучшение качества конечных изделий. Однако хорошо известно, что присутствие водорода в количестве 5–7 атомных процентов в объеме технологических материалов приводит к образованию протяженных дефектов [1]. На базе этого явления реализована технология по формированию структур кремний на изоляторе [2] (Smart-Cut). В отличие от исследований, направленных на изучение пассивацией водородом дефектов, главная тема проводимых исследований – управляемое формирование дефектов в объеме и на поверхности

пластин кремния обусловленное локальным присутствием водорода. Необходимая концентрация водорода в локальном месте достигается ионной имплантацией. Конечная цель формирования дефектов – синтез на их месте структур состава Si_xO_y или Si_xN_y , в результате геттерирования на дефектах кислорода или азота, вводимых в кремний из плазмы [3–5].

В кремниевой технологии существует ряд технологий, когда структурированные диэлектрические слои необходимо получить не в объеме, а на поверхности или приповерхностной области кремниевой пластины. В этом случае, необходимую локальную концентрацию водорода (и соответственно дефектов), в принципе, возможно получить обрабатывая пластины кремния в плазме водорода. Цель проведенных исследований – изучить

модификацию поверхности и возможность накопления водорода в приповерхностном слое пластин кремния, после воздействия DC плазмы водорода с разной энергией и при разных температурах.

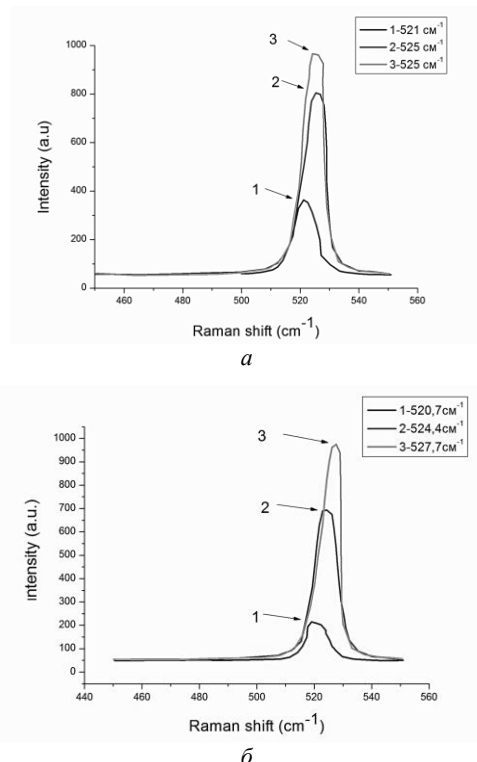


Рисунок 1 – Спектры КР от пластин Cz Si p-типа в спектральном диапазоне 450-600 cm^{-1} . Пластины обрабатывались DC плазме водорода при 250 °C в течение 60 (а) и 120 (б) мин. Разность потенциалов и плотность тока составляла: $U = 5 \text{ kV}$ (1), $U = 2,5 \text{ kV}$ (2), $U = 1 \text{ kV}$ (3). $J = 60 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$

Эксперимент. В стандартные пластины p-типа 10 см CzSi водород вводился из DC плазмы при 250 °C и 400 °C. Энергия ионов в процессе плазменной обработки составляла 5 (образец 1), 2,5 (образец 2) или 1 kV (образец 3). Длительность обработки составляла 60 и 120 минут при плотности тока 60 $\mu\text{A/cm}^2$. Расстояние между анодом и катодом регулировалось в зависимости от энергии ионов и составляла 60–120 мм.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) снимались при комнатной температуре с использованием газового Ar^+ лазера с длиной волны 488 nm и выходной мощностью 20 mW. Лазерный пучок фокусировался на исследуемых образцах с помощью микроскопа с увеличением X100. Регистрация сигнала производилась с использованием дифракционной решетки 1800 линий/мм и охлаждаемой CCD матрицы.

Результат. Спектры КР в спектральном диапазоне 450–550 cm^{-1} , для образцов Cz-Si обработанных при 250 °C в DC плазме водорода представлены на рисунке 1.

Спектры комбинационного рассеяния в спектральном диапазоне 4050–4250 cm^{-1} , для образцов

Cz-Si обработанных при 250 °C в DC плазме водорода представлены на рисунке 2.

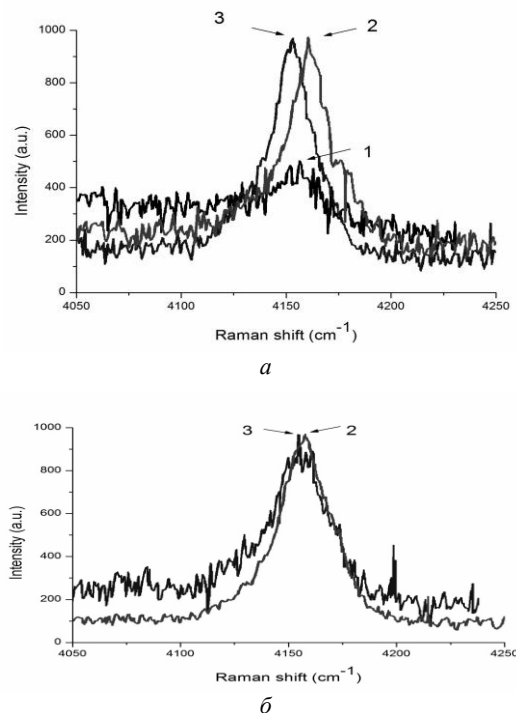


Рисунок 2 – Спектры КР от пластин Cz Si p-типа в спектральном диапазоне 4050–4250 cm^{-1} . Пластины обрабатывались DC плазме водорода при 250 °C в течение 60 (а) и 120 (б) мин. Разность потенциалов и плотность тока составляла: $U = 5 \text{ kV}$ (1), $U = 2,5 \text{ kV}$ (2), $U = 1 \text{ kV}$ (3). $J = 60 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$

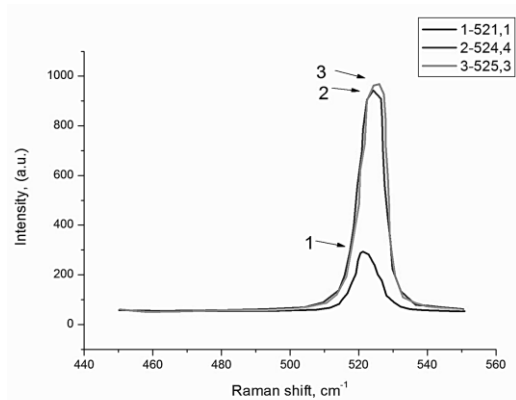


Рисунок 3 – Спектры комбинационного рассеяния от пластин Cz Si p-типа в спектральном диапазоне 4050–4250 cm^{-1} . Пластины обрабатывались DC плазме водорода при 250 °C в течение 60 (а) и 120 (б) мин. Разность потенциалов и плотность тока составляла: $U = 5 \text{ kV}$ (1), $U = 2,5 \text{ kV}$ (2), $U = 1 \text{ kV}$ (3). $J = 60 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$

Заключение В пластины монокристаллического Si вводился водород из DC плазмы при разности потенциалов $U = 5, 2,5$ и 1 kV. Из полученных результатов исследований методом КР можно сделать вывод, что наиболее оптимальные условия введения водорода, является обработка в плазме при $U = 1 \text{ kV}$.

Литература

1. Terreault, B. High fluence retention of gas in materials: a review / B. Terreault // *Physica status solidus (a)*. – 2007. – Vol. 204, № 7. – P. 2129–2146.
2. Bruel, M. Silicon on insulator material technology / M. Bruel // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1996. – Vol. 108, № 3. – P. 313–319.
3. Исследование структурных свойств тонких пленок, полученных методом ионной имплантации /

А. В. Францкевич, Э. И. Рау, Р. А. Сеннов [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2004. – № 3. – С. 52–56.

4. Structural and optical properties of ion-implanted silicon layers / A. V. Frantskevich, A. M. Saad, N. V. Frantskevich [и др.] // *Vacuum*. – 2009. – № 1. – P. 103–106.

5. Electrical properties of modified silicon structures / N. V. Frantskevich, A. K. Fedotov, A. V. Frantskevich [и др.] // *Acta Physica Polonica A*. – 2014. – Vol. 125, № 5. – P. 1332–1334.

УДК 62-233.3/9

ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ПЛАСТИКОВЫХ ДЕТЕЛЕЙ В ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Шевель Н. А.¹, Бурак В. А.²

¹РУП Издательство «Белорусский Дом Печати»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются особенности износа пластиковых зубчатых передач и иных деталей из полимеров, применяемых в различном полиграфическом оборудовании. Указаны ключевые механизмы разрушения пластиковых деталей при эксплуатации в цифровых и офсетных печатных машинах, а также влияние материала и конструкции на долговечность. Проведен сравнительный анализ полимеров, выявлены наиболее стойкие материалы и предложены практические рекомендации для повышения надежности оборудования.

Ключевые слова: полиграфическое оборудование, пластиковые зубчатые передачи, износ, долговечность, полимеры.

SPECIFIC FEATURES OF WEAR OF PLASTIC GEARS IN PRINTING EQUIPMENT

Shevel N. A.¹, Burak V. A.²

¹Republican unitary enterprise «PUBLISHING HOUSE «Belarusian Printing House»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The paper examines the specific features of wear of plastic gears and other details used in printing equipment. The key mechanisms of failure under operating conditions in digital and offset printing machines are presented, along with the influence of material properties and design parameters on durability. A comparative analysis of polymers was carried out, the most resistant materials were identified, and practical recommendations were proposed to improve the reliability of the equipment.

Keywords: printing equipment, plastic gear transmissions, wear, durability, polymers

Адрес для переписки: Шевель Н. А., Независимости 79/1, г. Минск 220005, Республика Беларусь
e-mail: shevel48@gmail.com

В последние десятилетия в машиностроении и приборостроении, в частности в полиграфической отрасли, все более широко применяются пластиковые материалы. Их использование связано не только с удешевлением и упрощением конструкции, но и с возможностями современных технологий – литья под давлением, экструзии и 3D-печати. Применение пластиков в зубчатых передачах печатных машин позволяет существенно снизить массу узлов, повысить технологичность их производства, уменьшить шум и вибрацию в процессе работы. Однако эксплуатация полимерных материалов сопряжена с целым комплексом факторов риска: они подвержены термодеструкции, усталостным процессам, химической деградаци и деформациям при длительной нагрузке. Все вышеперечисленные аспекты ограничивают срок службы

оборудования и требует научного анализа для поиска оптимальных материалов, технологий и создания режимов работы оборудования, обеспечивающих долговечность и хорошие эксплуатационные характеристики.

В современных условиях в полиграфии на всех направлениях наблюдается устойчивая тенденция к увеличению доли цифровых печатных машин, в конструкции которых пластиковые детали играют ключевую роль. Цифровые печатные машины представляют собой оборудование, предназначенное для непосредственной передачи изображения с цифрового файла на запечатываемый материал без промежуточных формных процессов. Одновременно сохраняется высокая нагрузка на офсетные комплексы, предназначенные для печати больших тиражей, в которых пластики также применяются – особенно в транспортных и пневматических

системах. В условиях роста стоимости сервисного обслуживания и необходимости продления ресурса оборудования задача оценки долговечности пластиковых передач становится приоритетной. А решение этой задачи неотъемлемо связано с изучением особенностей износа и факторов, положительно и негативно влияющих на это явление.

Для правильного и корректного выполнения поставленной задачи исследования особенностей износа пластиковых элементов конструкций оборудования в полиграфии необходимо выполнить следующее:

- провести анализ эксплуатационных условий работы пластиковых передач в различных типах оборудования, на примере применяемого в издательстве;

- классифицировать механизмы износа (абразивный, усталостный, химический, термодеструкция);

- проанализировать существующие методики расчета ресурса и адаптировать их к особенностям применяемых в полиграфии полимеров;

- оценить преимущества и недостатки различных видов пластика (ABS, HIPS, PETG, полиамиды), применяемых рассматриваемом в оборудовании.

Методическая основа включала использование как эмпирических наблюдений, так и теоретических моделей. Для расчета напряжений в основании зуба применялась формула Льюиса. Для анализа усталостной долговечности использовался закон Баскена, позволяющий определить количество циклов до отказа при переменных нагрузках. Для учета накопления повреждений применялось правило Пальмгрена–Майнера. В случаях химической деградации, характерных для деталей проявочных процессоров, использовалась модель Аррениуса, описывающая температурно-ускоренное старение полимера. Для деталей транспортных систем использовался закон Арчарда, позволяющий количественно оценить скорость изнашивания в зависимости от нагрузки и твердости материала.

Исследование показало, что условия работы пластиковых передач существенно различаются в цифровых и офсетных машинах.

В цифровых машинах основными факторами, ускоряющими износ пластиковых деталей являются:

- высокая температура в зоне закрепления тонера (до 120–130 °C);

- значительные скорости вращения и циклические нагрузки;

- контакт пластик–металл в передачах. например таких, как привод и транспортировочный вал, приводящий к «слизыванию» зубьев пластикового зубчатого колеса;

- термическое старение и потеря геометрической стабильности вследствие воздействия температур.

В офсетных машинах как факторы, приводящие к износу пластиковых узлов и передач доминируют:

- вибрационные и ударные нагрузки различного происхождения;

- усталостные трещины в основании зубьев вследствие воздействия перепадов температуры и вибрации;

- износ посадочных мест и выкрашивание профиля, например, пластиковые посадочные втулки для металлических сердечников при их контакте.

Сравнительный анализ материалов показал, что PETG имеет более высокую стойкость к термодеструкции и усталостным процессам по сравнению с ABS и HIPS. Композиционные материалы с армированием волокнами демонстрируют наибольший потенциал для повышения ресурса использования пластмассовых деталей в передачах оборудования.

Результаты исследования позволяют утверждать, что грамотный выбор материала и использование аддитивных технологий существенно продлевают ресурс пластиковых узлов и, как следствие, увеличивают срок эксплуатации узлов печатного оборудования. Применение расчетных методик обеспечивает возможность прогнозирования времени до отказа, что особенно важно при планировании сервисного обслуживания. При работе на печатном оборудовании это означает снижение вероятности внезапных поломок, соответственно, сокращение простоев и уменьшение эксплуатационных затрат.

Кроме того, результаты работы открывают перспективы внедрения систем диагностики, дефектоскопии и структуроскопии для контроля состояния пластиковых деталей. Использование магнитных, акустических и оптических методов позволяет отслеживать процесс старения и предсказывать момент выхода из строя.

Таким образом, было подтверждено, что эффективность применения пластиковых зубчатых передач определяется не только их экономичностью, но и устойчивостью к комплексному воздействию механических, термических и химических факторов. Для повышения долговечности необходимо сочетание инженерных решений (оптимизация конструкции, правильное сопряжение поверхностей) и материаловедческих подходов (подбор термостойких и композиционных полимеров).

Перспективным направлением является интеграция расчетных моделей остаточного ресурса с системами мониторинга состояния печатного оборудования. Такой подход позволит перейти от планово-предупредительного ремонта к адаптивному сервису, что значительно повысит надежность полиграфических комплексов и обеспечит устойчивое развитие отрасли, обеспечив при этом более высокую экономичность печатных услуг.

Литература

1. The regional nanosatellite constellation modelling formation by a piggyback launch from different spaceports / A. A. Spiridonov [et al.] // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2022. – № 2. – P. 50–59.

2. Cappelletti, C. Cubesat Handbook / C. Cappelletti. – Academic Press, 2021. – 461 p.

3. Разработка системы атмосферных зондов для организации клиентско-серверной связи / Е. Д. Юшкевич [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных: материалы конференции. – Мн.: БГУ, 2024. – С. 129–132.

4. Разработка система приема сигнала для организации трассы оптической связи в условиях атмосферы / Е.Д. Юшкевич [и др.] // RusNanoSat-2023: сборник тезисов. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – С. 177–179.

УДК 629.7.02

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ГРУППИРОВКИ СВЕРХМАЛЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЗОНДОВ

Юшкевич Е. Д., Кураков И. А., Бореико Д. А., Ильюшенко А. С., Шкурская Ю. А., Баранова В. С., Спиридонов А. А., Ушаков Д. В., Саечников В. А.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены концепция и практическая реализация системы развертывания группировки атмосферных зондов. Рассматриваются конструктивные особенности зондов, их технические параметры и реализованные алгоритмы функционирования. Актуальность проведенных разработок определяется возрастающей значимостью создания экономичных и адаптивных спутниковых систем.

Ключевые слова: группировка атмосферных зондов, аппарат-деплойер.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE AND HARDWARE METHOD FOR DEPLOYING A GROUP OF ULTRA-SMALL ATMOSPHERIC PROBES

Yushkevich E. D., Kurakov I. A., Boreiko D. A., Ilyushenko A. S., Shkurskaya Y. A., Baranova V. S., Spiridonov A. A., Ushakov D. V., Saechnikov V. A.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The developed concept and practical implementation of the system for deploying a constellation of atmospheric sounders are presented. The paper examines the design features of the sounders, their technical parameters, and the implemented operating algorithms. The relevance of the research is determined by the increasing importance of creating cost-effective and adaptive satellite systems.

Keywords: atmospheric probe grouping, deployer apparatus.

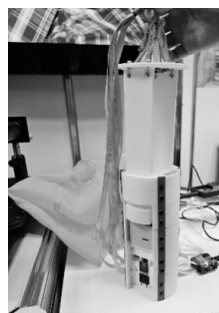
*Адрес для переписки: Кураков И. А., ул. Радужная 10, г. Минск 220020, Республика Беларусь
e-mail: rct.kurakov@bsu.by*

Введение. Использование спутниковых группировок в настоящее время является одной из ведущих тенденций в развитии космических систем [1]. Разработаны система отстыковки и конструкции аппаратов для развертывания краткосрочной группировки атмосферных зондов, использование которых может быть расширено для исследования широкого спектра задач мониторинга и связи

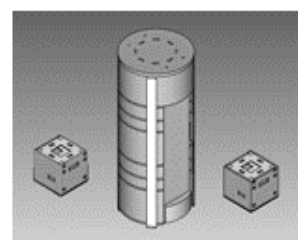
Конструкция и компоновка электроники системы выбрасывания аппарата-деплойера.

Конструкция аппарата-деплойера, а также общий вид представлены на рисунке 1 (а, б). Корпус аппарата-деплойера представляет собой цилиндр с диаметральной размерами в 80 мм и высотой 189 мм. Конструкция аппарата-деплойера разработана в виде легкосборного корпуса, состоящего из нескольких прямоугольных панелей с соединительными пазами для крепежа. Как можно увидеть из рисунка 2, структура деплойера модульная, то есть отсеки под расположение полезной нагрузки в виде сверхмалых зондов, систем отстыковки и бортовой электроники – находятся раздельно. В верхней части деплойера располагается отсек для

бортовой электроники, а два выпускаемых зонда располагаются друг над другом в нижней части.



а



б

Рисунок 1 – Конструкция аппаратов укомплектованный аппарат-деплойер (а), общий вид аппаратов (б)

В качестве выпускаемых аппаратов выступают два сверхмалых атмосферных зонда, формата PocketCube [2] (MiniSat).

Конструкция системы развертывания аппарата-деплойера разработана для реализации безопасной и контролируемой отстыковки аппаратов

Minisat на высоте до 2000 м [4]. Разработан механизм, сочетающий в себе две подсистемы: створки, которые сдвигаются вверх при выдергивании чеки усилием раскрывающегося парашюта, и система закрепления Minisat-ов (рисунок 3), состоящая из фиксатора и мотора, его открывающего.

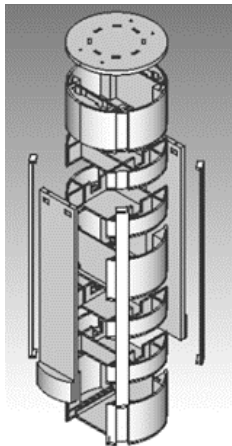


Рисунок 2 – Конструкция аппарата-деплойера (exploded view)

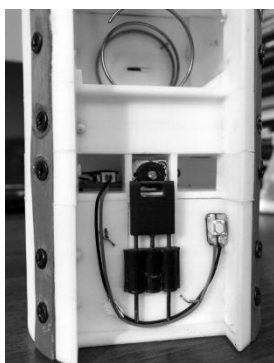


Рисунок 3 – Выпускной механизм

В конструкции реализован принцип разнонаправленного выпуска MiniSat-ов относительно деплойера. Такой подход минимизирует возмущающее воздействие процесса отделения на пространственную ориентацию деплойера, а также исключает возможное столкновения аппаратов. Фиксация аппаратов Minisat осуществляется посредством металлических петель, удерживаемых шпилькой. Активация системы происходит при выдергивании чеки, соединенной со стропой парашюта, что инициирует размыкание контрольной

электрической цепи. Бортовой компьютер, фиксируя изменения состояния цепи, формирует и исполняет команду на разблокировку фиксаторов. Последующая активация пружинного узла обеспечивает выталкивание аппаратов на расстояние около 2 м от носителя.

Принципиальная схема системы выпуска представлена на рисунке 4.

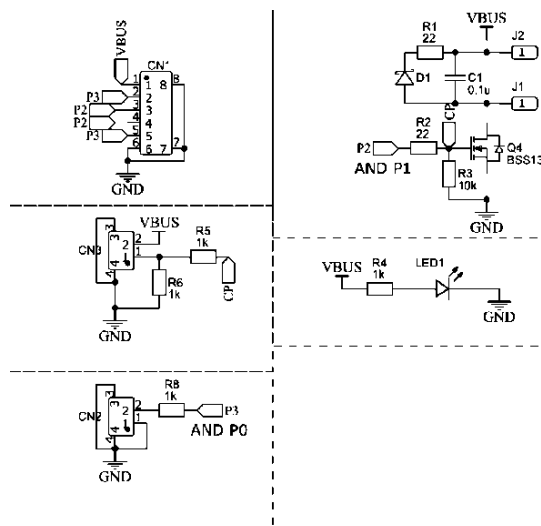


Рисунок 4 – Принципиальная схема системы выпуска

Заключение. Разработана система разворачивания группировки атмосферных зондов. В работе рассмотрены конструктивные особенности зондов, их технические параметры и реализованные алгоритмы функционирования.

Литература

1. The regional nanosatellite constellation modelling formation by a piggyback launch from different spaceports / A. A. Spiridonov, V. S. Baranova, V. A. Saetchnikov, D. V. Ushakov // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2022. – № 2. – P. 50–59.
2. Cappelletti, C. Cubesat Handbook / C. Cappelletti, S. Battistini. – Academic Press, 2021. – 461 p.
3. Разработка системы атмосферных зондов для организации клиентско-серверной связи / Е. Д. Юшкевич, Д. А. Бореико, И. А. Кураков [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных: материалы конференции. – Мн.: Издательство БГУ, 2024. – С. 129–132.
4. Разработка система приема сигнала для организации трассы оптической связи в условиях атмосферы / Е. Д. Юшкевич [и др.] // RusNanoSat-2023: сборник тезисов докладов симпозиума. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – С. 177–179.

УДК 681.5.09

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ ТЕНЗО- И ВИБРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Реутская О. Г., Войцеховский А. А., Князев М. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предлагается новый метод диагностики для прогнозирования износа и преждевременного выхода из строя компонент производственно-технической систем на основе использования сигналов тензо- и виброметрических датчиков и их анализа при помощи дискретных вейвлетов.

Ключевые слова: тензо- и виброметрические датчики, дискретный вейвлет анализ, бинарные векторы.

APPLICATION OF DISCRETE WAVELETS FOR ANALYSIS OF SIGNAL CHARACTERISTICS FOR TENSO- AND VIBROMETRICAL SENSORS

Reutskaya O. G., Vaitsiakhouski A. A., Knyazev M. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. New method of diagnostics for prognostication of wearing and before time destroying of components productive and technical systems is proposed. The method is based on an using the signals of tenso- and vibrometrical sensors and their analysis by applying discrete wavelets.

Keywords: tenso- and vibrometrical sensors, discrete wavelet analysis, binar vectors.

*Адрес для переписки: Реутская О. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com*

При проектировании и разработке различного рода датчиков, преобразователей, сенсоров и т. п. методы, используемые в технической диагностике, находят широкое применение. Достижение оценки распознавания истинного состояния объекта, а также классификации этого состояния являются общими проблемами в данной области. Их гарантированное разрешение позволяет избежать пропуска неисправностей в изделиях и уменьшить вероятность появления ложного сигнала о наличии неисправности. Следовательно, одним из перспективных направлений при решении задач создания новых преобразователей может считаться теоретический анализ используемых методов диагностики.

Дискретный вейвлет анализ представляет хорошую возможность преодолеть указанные выше проблемы. При его применении имеется возможность записывать исследуемый сигнал в виде ряда по дельта-функциям. При этом, как правило, коэффициенты представления при дельта-функциях различны. При исследовании того или иного сигнала в соответствии с конкретной задачей подбирается дельта-функция и ее параметры. Каждая дельта-функция с коэффициентом n может быть записана в виде суммы n единичных дельта-функций. В результате такого представления измеряемый сигнал принимает вид, который принято называть бинарным вектором [1].

Бинарные векторы находят широкое применение, особенно в тех случаях, когда эффективность проводимых вычислений и оптимизация процессов хранения данных играют определяющую роль. В крупномасштабных системах искусственного интеллекта, например, таких как поисковые или рекомендательные системы, обработка огромных объемов данных в реальном времени является ключевой задачей.

Уменьшая размеры векторов, сопоставляемых измеряемым сигналам, при помощи двоичных векторов можно снизить как время ожидания, так и вычислительные затраты без существенного ущерба для точности вычислений. Кроме того, использование двоичных векторов полезно в средах с ограниченными ресурсами (например, в мобильных телефонах или встроенных системах с ограниченными объемами памяти или

ограниченной вычислительной мощностью). Использование двоичных кодов позволяет реализовывать сложные функции при упомянутых выше ограничениях и при этом сохранять высокую производительность вычислений. Представление исследуемого сигнала посредством бинарных векторов дает возможность повысить эффективность и достоверность диагностики уровней надежности компонент системы. Обработка получаемых сигналов при диагностике упрощается при идентификации расположения единиц в бинарном векторе. В таких случаях применение бинарных векторов требуется для того, чтобы при записи сигнала в виде ряда по дельта-функциям, уменьшить время, затрачиваемое на вычисление коэффициентов при дельта-функциях, а значит, увеличить производительность вычислений. Вейвлет анализ позволяет осуществить однозначное представление сигналов [2]. Следует отметить, что для успешного применения вейвлет анализа необходимо создать исходную базу сигналов преобразователей в зависимости от состояния рассматриваемой детали механизма или системы.

В настоящей работе предложен научно-обоснованный метод диагностики, который позволяет теоретически прогнозировать износ и преждевременный выход из строя деталей производственно-технической системы (например, зерно- или хлопкоуборочного комбайна). Разработана методика диагностического анализа характеристик тензо- и виброметрических сигналов технического происхождения по бинарным векторам, полученных дискретными вейвлетами. Полученные результаты находят применение в станкостроительной технике, машиностроении, включая аграрнотехническое машиностроение.

Литература

1. Алексеев, В. В. Стационарное дискретное вейвлет-преобразование. Вопросы применения в задачах фильтрации / В. В. Алексеев, Е. Ю. Закемовская // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – № 6. – С. 62–68.
2. Гулай, А. В. Интеллектуальная технология вейвлет-анализа вибрационных сигналов / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 101–110.

УДК 620.178.7:621.9.048

**ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА
ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Микитевич В. А.¹, Протасеня Т. А.², Воробей Р. И.¹, Гусев О. К.¹, Пантелеев К. В.¹, Тявловский А. К.¹, Жарин А. Л.¹, Самарина А. В.¹, Крень А. П.², Мацулевич О. В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Прикладное программное обеспечение предназначено для управления измерительной установкой для исследования процессов упругопластического деформирования материалов и измерения их механических характеристик методом инструментального индентирования и вывода числовой и графической информации о ходе и результатах измерений с использованием виртуальной системы управления. Вывод результата измерений (графическое представление), как и управление процессом индентирования, осуществляется в режиме реального времени на основе оригинальных алгоритмов управления измерительной установкой и обработки сигналов от датчиков силы и перемещения.

Ключевые слова: программное обеспечение, упругопластическое деформирование, индентирование, оконный интерфейс, диаграмма вдавливания.

**SOFTWARE AND ALGORITHMIC TOOLS FOR SUPPORTING THE PROCESS OF MEASURING
THE ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF MATERIALS**

**Mikitsevich V. A.¹, Pratasenia T. A.², Vorobey R. I.¹, Gusev O. K.¹, Pantsialeu K. U.¹,
Tyavlovsky A. K.¹, Zharin A. L.¹, Samarina A. V.¹, Kren A. P.², Matsulevich O. V.²**

¹Belarusian National Technical University

²Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The applied software is designed to control a measuring system for studying elastoplastic deformation processes in materials and measuring their mechanical properties using instrumented indentation technique. It displays numerical and graphical information about the progress and results of measurements using a virtual control system. The display of measurement results (graphical representation), as well as the control of the indentation process, is performed in real time using proprietary algorithms for controlling the measuring system and processing signals from force and displacement sensors.

Keywords: software, elastoplastic deformation, indentation, window interface, indentation diagram.

*Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Традиционные измерения упругопластических свойств материалов методом индентирования предусматривают выполнение ряда ручных либо частично механизированных операций (вдавливание индентора с определенной силой нагружения, измерение диаметра отпечатка, построение диаграммы вдавливания по отдельным экспериментальным точкам), что является трудоемким и не гарантирует объективности получаемых результатов. Использование в таких измерениях (испытаниях) автоматизированных средств измерений под управлением персонального компьютера позволяет исключить ручные операции, однако требует разработки и отлаки специальных программно-алгоритмических средств, обеспечивающих как управление режимом испытаний, так и обработку их результатов по специфичным алгоритмам с учетом заданного режима. При разработке таких средств необходимо учитывать, что часть данных, получаемых в ходе ручных операций (в частности, диаметр отпечатка), недоступна для автоматизированных средств. В то же время, для

алгоритмической обработки могут использоваться другие данные, в частности, глубина погружения индентора, анализируемые в реальном масштабе времени и используемые, в том числе, как сигналы обратной связи для управления процессом индентирования. Проведенный анализ показал, что при этих условиях вся необходимая информация об упругопластических свойствах материалов может быть получена только на основе математического анализа диаграммы вдавливания, получаемой по результатам обработки показаний датчиков силы и глубины вдавливания без измерения диаметра отпечатка, при условии, что управление режимом вдавливания также осуществляется автоматически в реальном времени в замкнутом контуре обратной связи.

Разработанное прикладное программное обеспечение (ПО) предназначено для управления измерительной установкой для исследования процессов упругопластического деформирования материалов и измерения их механических характеристик методом инструментального индентиро-

вания, вывода числовой и графической информации о ходе и результатах измерений с использованием виртуальной системы управления, в рамках которой все управляющие элементы представлены на экранном интерфейсе персонального компьютера (рисунок 1). С учетом разнообразия режимов работы измерительного комплекса, для исключения перегрузки экранного интерфейса элементами управления и удобного вывода числовой и графической информации о ходе и результатах измерений для виртуальной панели управления применен оконный интерфейс, включающий область ввода параметров режима нагружения и область вывода графического результата измерений. Вывод результата измерений (графическое представление), как и управление процессом индентирования, осуществляется в режиме реального времени.

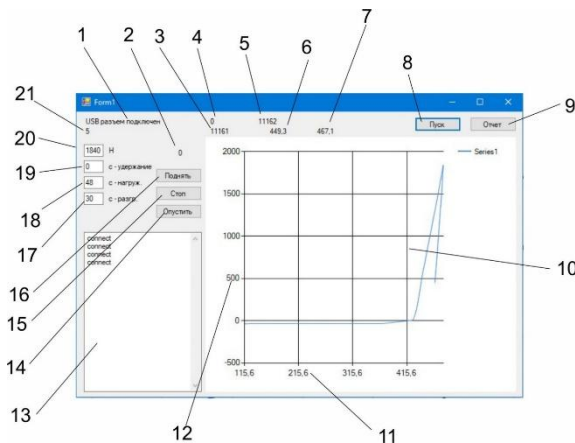


Рисунок 1 – Окно приложения

Представленные в оконном интерфейсе элементы управления и отображения включают:

1 – индикатор подключения по шине USB: «USB разъем подключен» / «USB разъем не подключен!»;

2 – индикатор состояния: «1» – каретка в верхнем положении (сработал верхний концевой выключатель); «2» – каретка в нижнем положении (сработал нижний концевой выключатель); «0» – ошибка (сработали верхний и нижний концевой выключатели);

3 – номер текущего измерения;

4 – индикатор очереди копирования результатов измерения из электронного блока в персональный компьютер (0 соответствует отсутствию очереди – данные передаются в реальном времени);

5 – номер текущих скопированных данных;

6 – текущее значение силы в ньютонах;

7 – текущее значение перемещения в микрометрах;

8 – кнопка запуска цикла измерения;

9 – кнопка сохранения результатов измерения (данные сохраняются в текстовый файл в три

столбца: номер измерения, значение перемещения в микрометрах, значение силы в ньютонах);

10 – область построения диаграммы нагружения в реальном времени;

11 – ось абсцисс – значения перемещения в микрометрах;

12 – ось ординат – значение силы в ньютонах;

13 – консоль состояния и индикации ошибок;

14 – кнопка запуска перемещения каретки вниз;

15 – кнопка останова;

– в режиме перемещения – останавливает перемещение;

– в режиме измерения – осуществляет останов процесса измерения и возврат каретки;

16 – кнопка запуска перемещения каретки вверх;

17 – время процесса разгрузки в секундах;

18 – время процесса нагружения в секундах;

19 – время удержания при максимальной силе в секундах;

20 – максимальная сила, прикладываемая индентором к образцу в ньютонах;

21 – текущее состояние комплекса: «0» – исходное состояние; «1» – движение вниз; «2» – движение вверх; «3» – процесс нагружения; «4» – процесс удержания при максимальной силе; «5» – процесс разгрузки; «6» – очистка памяти электронного блока управления.

С использованием данного ПО управление процессом измерения упругопластических свойств сводится к заданию основных числовых параметров режима испытаний, например:

– сила нагружения – 2000 Н;

– время удержания – 0 с;

– время нагружения – 10 с;

– время разгрузки – 10 с.

Результаты измерений могут быть сохранены в виде файла отчетной таблицы либо наглядно представлены графической диаграммой вдавливания (рисунок 2).

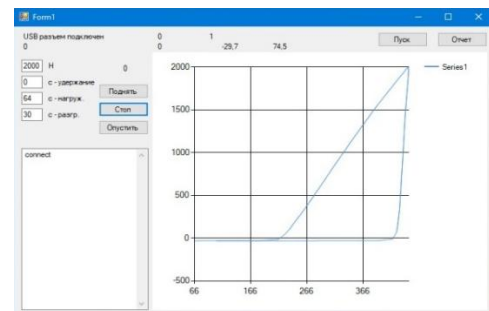


Рисунок 2 – Пример диаграммы вдавливания при испытании образца стали (100 HB)

На основании полученных результатов ПО осуществляет автоматический расчет упругопластических характеристик материала.

УДК 620.178.7:621.9.048

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Микитевич В. А.¹, Мацулевич О. В.², Воробей Р. И.¹, Гусев О. К.¹, Пантелеев К. В.¹, Тявловский А. К.¹, Жарин А. Л.¹, Самарина А. В.¹, Крень А. П.², Протасеня Т. А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Аппаратно-программный комплекс для исследования процессов упругопластического деформирования материалов предназначен для научных исследований и измерения механических характеристик различных материалов методом инструментального индентирования, в том числе в учебных целях. Измерения проводятся путем построения диаграммы вдавливания на основе показаний датчиков измерения нагрузки и перемещения индентора и последующей компьютерной обработки полученной диаграммы с учетом заданного режима испытания.

Ключевые слова: упругопластическое деформирование, твердость, модуль упругости, индентирование, неразрушающий контроль.

**HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR STUDYING THE PROCESSES OF ELASTIC AND
PLASTIC DEFORMATION OF MATERIALS**

**Mikitsevich U. A.¹, Matsulevich O. V.², Vorobey R. I.¹, Gusev O. K.¹, Pantisaleyeu K. U.¹,
Tyavlovsky A. K.¹, Zharin A. L.¹, Samarina A. V.¹, Kren A. P.², Pratasenia T. A.²**

¹Belarusian National Technical University

²Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The hardware and software complex for studying elastic and plastic deformation processes in materials is designed for scientific purposes and for measurement of the mechanical properties of various materials using instrumented indentation, including for educational purposes. Measurements are performed by plotting an indentation diagram based on readings from load and displacement sensors, followed by computer processing of the resulting diagram with regard to the specified test conditions.

Keywords: elastic and plastic deformation, hardness, modulus of elasticity, indentation, non-destructive testing.

*Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Разработанный в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники БНТУ аппаратно-программный комплекс для исследования процессов упругопластического деформирования материалов предназначен для научных исследований и измерения механических характеристик различных материалов методом инструментального индентирования, в том числе в учебных целях при выполнении лабораторных работ студентами специальности 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы и системы», профилизации «Информационные системы и технологии» и смежным специальностям. Комплекс позволяет получить в одном измерительном цикле такие физико-механические характеристики материалов, как твердость, модуль упругости, предел прочности, предел текучести, пластичность и др. Весь комплекс необходимых данных может быть получен посредством измерений на готовом изделии без его разрушения и создания какого-либо значительного дефекта. Областью применения комплекса является контроль ответственных объектов, а также в научных целях для исследования упруго-пластических свойств

материалов и при подготовке специалистов в области материаловедения, механики деформируемого твердого тела, неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий.

От аналогичных по назначению измерительных установок, таких как Frontics AIS 3000 (Frontics, Республика Корея), ABI SSM (ABI, США), Mubatec HU-1 (Mubatec, Германия) разработку отличает расширенный перечень режимов испытаний и определяемых параметров, а также более широкий диапазон измерений нагрузок и перемещений индентора, что придает комплексу качественно новые свойства, а именно возможность проводить испытания с твердостью значительно меньшей, чем у металлов. Это позволяет производить контроль не только твердости, но и модуля упругости изотропных и композитных полимерных материалов, характеризующихся быстрым переходом от упругой к пластической деформации уже при малых нагрузках.

Разработанный комплекс обеспечивает диапазон рабочей нагрузки от 5 до 2000 Н с погрешностью ее установки и измерения не более $\pm 1\%$. При этом по результатам испытаний нижняя граница регистрации силы, приложенной к индентору, составила

0,4 Н, что обеспечивает возможность контроля наиболее мягких полимерных материалов. Комплекс обеспечивает автоматическое измерение твердости по шкале Бринелля в диапазоне от 100 до 450 НВ и по шкале Роквелла в диапазоне от 20 до 68 HRC; измерение модуля упругости в диапазоне от 70 до 200 ГПа; измерение предела прочности (временного сопротивления) сталей перлитного класса (определяется путем пересчета из твердости согласно ГОСТ 22761 п. 4.3, приложение 2) в диапазоне от 380 до 1700 МПа.

Измерения проводятся путем построения диаграммы вдавливания на основе показаний датчиков измерения нагрузки (тензометрический датчик мембранного типа Zemic HM2D4-C3-1.0t-5B6-D41) и перемещения индентора (фотоэлектрический преобразователь ЛИР-19А) и последующей компьютерной обработки полученной диаграммы с учетом заданного режима испытания [1, 2]. Погрешность измерения перемещения индентора не превышает ± 1 мкм.

Помимо использования прецизионных измерительных преобразователей, высокая точность измерения достигается за счет использования жесткой пространственной рамы для нагружения образцов (рисунок 1).

В процессе измерений момент касания индентором поверхности испытуемого образца определяется автоматически по изменению показаний датчика силы, что обеспечивает корректное построение диаграммы вдавливания. При определении силы вдавливания учитывается собственный вес каретки, на которой закреплен индентор. Комплекс обеспечивает работу со сменными инденторами (сферическими различного радиуса, коническими, пирамидальными). Выполнение ручных операций, таких как измерение диаметра отпечатка, при этом не требуется.

Испытания комплекса подтвердили достижение заявленных характеристик. Время установления рабочего режима при этом не превысило 15 с. Минимальная скорость вдавливания индентора при испытаниях материалов различной твердости (100, 187 и 400 НВ) составила 0,2 мкм/с, максимальная 19,7 мкм/с, что позволяет производить испытания упругопластических свойств материалов как в статическом, так и в динамическом режимах.

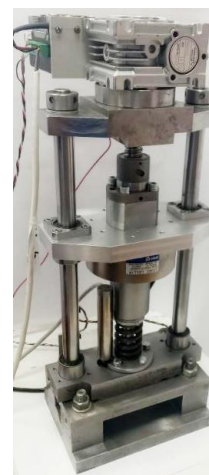


Рисунок 1 – Установка инструментального индентирования, составляющая основную аппаратную часть комплекса для исследования процессов упругопластического деформирования материалов

Литература

1. Крень, А.П. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования / А. П. Крень, О. В. Мацулевич, М. Н. Делендик // Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 3. – С. 263–271.
2. Рудницкий, В.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Литье и металлургия. – 2017. – №2. – С. 81–87.

SECTION 6. SHAPING INDUSTRY 5.0: THE SYNERGY OF INTELLIGENT AUTOMATION,
DIGITAL COMMUNICATION & ADVANCED ELECTRONICS FOR A SUSTAINABLE
SMART FUTURE

UDC 681

TWO DECADES OF SHAPING ADAPTIVE ELECTRONIC ENGINEERS FOR
SUSTAINABLE INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DIGITAL TRANSFORMATION:
THE CASE OF THE ELECTRONIC ENGINEERING DEPARTMENT AT HARARE INSTITUTE
OF TECHNOLOGY, ZIMBABWE

Musiwa P. B., Muredzi P., Kanhukamwe Q. C., Makusha D. T., Rushambwa M. C., Chimonyo K. B.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper presents a longitudinal case study of the Department of Electronic Engineering at the Harare Institute of Technology (HIT), Zimbabwe, examining its evolution over two decades as a mandate-driven hub for competence-based, innovation-oriented engineering education. Since its establishment in 2005, the department has pioneered Zimbabwe's Education 5.0 framework, embedding technopreneurship, prototype-driven pedagogy, and direct industrial engagement into its curriculum. The study situates HIT's model within global discourses on engineering education reform, the Fourth and Fifth Industrial Revolutions (4IR/5IR), and the growing emphasis on entrepreneurial engineers. Evidence of impact includes programmatic expansions (Biomedical Engineering, Industrial Automation, and Telecommunications), graduate outputs, industry collaborations, and tangible innovations addressing national challenges. The findings position HIT's approach as a replicable model for higher education institutions in developing economies aiming to align engineering education with sustainable development and digital transformation.

Keywords: Engineering Education, Education 5.0, Competence-Based Curriculum, Technopreneurship, HIT.

Address for correspondence: Peter B. Musiwa, BE277 Belvedere Harare Zimbabwe
e-mail: pbmusiwa@hit.ac.zw

Introduction. African universities are under critical pressure to adapt to rapid global changes and drive the continent's industrialization, innovation, and sustainable development [1, 2]. Unlike conventional universities, the Harare Institute of Technology (HIT), established in 2005, was specifically designed as a hub for technology research, incubation, transfer, and commercialization [3]. The Electronic Engineering Department fosters "hands-on" graduates for high-tech entrepreneurship, using a teaching framework that anticipated Zimbabwe's national adoption of Education 5.0, a model that adds innovation and industrialisation to the university's traditional mission [4, 5]. This paper presents the department's evolution as a case study in mandate-driven engineering education, contextualizing its methods within literature on competence-based learning, entrepreneurial engineering, and sustainable technologies.

Literature Review

A. Engineering Education Reforms. Engineering curricula globally have undergone significant reforms to address the mismatch between theory-based education and industry demands. Frameworks like CDIO (Conceive – Design – Implement – Operate) use project-based learning to develop problem-solving and innovation skills [6]. According to Crawley et al. [6], Engineering education must shift from rote technical training to a model that enables students to create real-world systems.

B. Education 5.0 and African Higher Education. Zimbabwe's Education 5.0 framework extends earlier models by mandating innovation and industrialisation as integral university functions [4]. African higher education policy increasingly positions universities

as engines of economic development [8]. As Chikoko [4] notes, "Education 5.0 redefines the university as a factory of ideas and industries, not merely a site of teaching and research." HIT's EE Department is notable for having operationalised these principles from inception.

C. Technopreneurship and Engineering Practice. Globally, there is rising emphasis on training engineers as technopreneurs innovators who translate technical knowledge into commercial ventures [9]. Min et al. [9] Reflecting the proven link between technopreneurship education and student start-ups, HIT's mandatory prototype-driven projects systematically foster an environment of innovation.

D. Industrial Revolutions and Curriculum Adaptation. The 4IR and 5IR demand specialised skills in automation, robotics, telecommunications, and intelligent systems [11]. Universities are adapting curricula to meet these challenges, with postgraduate programs increasingly focused on advanced technologies and digital transformation [12]. Sony [12] argues that to meet Industry 4.0's demand for adaptive, innovative, and cross-disciplinary engineers, EE introduced MTech programs in Industrial Automation and Telecommunications & Wireless Systems.

E. Design Projects in Engineering Curriculum. Design projects are a cornerstone of modern engineering education, where students apply their knowledge to solve complex, real-world problems. According to Howe and Wilbarger [14], "Design modules bridge the gap between theory and professional practice". They allow students to tackle open-ended challenges in teams, developing prototypes in industry-like environments. This process strengthens crucial professional

skills like project management, communication, and ethics, which are highly sought after by employers [15]. Design projects are particularly valued for generating locally relevant innovations that drive socio-economic development [16]. HIT's mandatory prototype projects serve as a capstone experience, reinforcing both technical competency and entrepreneurial readiness by requiring students to apply their knowledge to solve complex, real-world problems. According to Howe and Wilbarger [14], "capstone design courses provide the critical link between theory and professional engineering practice". They enable students to address open-ended design challenges, work in teams, and develop prototypes under conditions that mimic industry practice. Moreover, these projects strengthen professional skills such as project management, communication, and ethics, which are increasingly demanded by employers [15].

F. Student Mentorship Programmes in Engineering Education. Student mentorship programs are vital to engineering education, offering structured guidance that boosts both academic and professional success. Crisp and Cruz [13] argue that "mentoring relationships in higher education positively influence persistence, academic performance, and career development". It connects students with experienced lecturers, industry professionals, and peers, allowing for transfer of tacit knowledge, industry practices, and career insights [17]. Lutz and Paretti [18] highlight that mentorship fosters identity formation within the engineering profession, particularly by building confidence in problem-solving and teamwork. For electronic engineering students, mentorship programs are crucial for developing technical skills, innovation, and entrepreneurship. Simultaneously, they promote inclusivity and help correct gender imbalances by providing vital role models and targeted support for underrepresented groups [19]. At HIT, the mentorship model unites lecturers, senior students, and industry partners. This approach reinforces the department's production-based pedagogy and aligns with the best global practices.

Two Decades of Programmatic Evolution. Over the past two decades, the Electronic Engineering Department's growth has been a deliberate and strategic adaptation to emerging technological trends and pressing national needs. Its programs have evolved from foundational education to high-level specialization, a success underpinned by robust local and international collaborations with both industry and university partners.

The Foundational Years (2005): The Bachelor of Technology in Electronic Engineering

The department's journey began with its flagship BTech (Hons) in Electronic Engineering program, designed from its inception to produce "technopreneurs". The curriculum's focus on innovation, prototype construction, and solving real-world community challenges established the hands-on, entrepreneurial philosophy that has become the department's hallmark, equipping graduates to innovate across a wide spectrum of critical technology sectors.

An Incubator for New Disciplines (2020): The Genesis of Biomedical Engineering

In 2020, the department demonstrated its strategic maturity by launching a Biomedical Engineering program to address national healthcare challenges. Acting as a strategic incubator, the Electronic Engineering department leveraged its core expertise in electronics and systems design to nurture the program until it achieved the critical mass to become its own standalone department. This evolution showcases the department's capacity to incubate and launch new, high-impact disciplines, directly fulfilling HIT's institutional mandate to develop technology at a disciplinary level.

Ascending the Value Chain (2023): Postgraduate Specialization for the Fourth Industrial Revolution

In a targeted response to the 4IR, 5IR and national priorities, the department launched two MTech programs in 2023. The MTech in Industrial Automation is designed to modernize Zimbabwe's industrial sectors, while the MTech in Telecommunications and Wireless Systems aims to cultivate the expertise needed for national digital transformation and next-generation connectivity like 5G and the IoT. This strategic postgraduate expansion solidifies the department's role as a critical enabler of Zimbabwe's technological future by producing high-level specialists capable of leading its advancement.

D. Graduate Output and Impact.

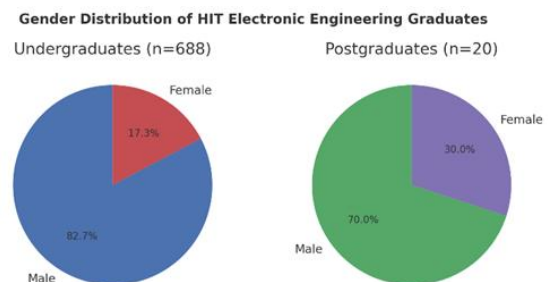


Figure 1 – Graduate Statistics

To date, the department has produced over 688 undergraduates (17.3 % female) and 20 postgraduates (30 % female). Graduates are employed in industry, research, and entrepreneurial ventures, contributing to national innovation and industrialisation.

Discussion

Alignment with Global Engineering Education Reforms. While HIT's production-oriented pedagogy aligns with global, project-based learning frameworks like CDIO (Conceive – Design – Implement – Operate), it goes a step further by deeply integrating innovation and enterprise development (Crawley et al., 2014) [6]. However, HIT extends this paradigm by embedding prototype-driven assessment, where students' progression depends on producing functional artefacts with commercial potential. As Crawley et al. [6] argue, "engineering education must move beyond rote technical training to a holistic model that enables students to conceive and implement real systems". HIT operationalises

this by coupling prototype development with entrepreneurship, positioning graduates not only as job seekers but as potential employers and innovators. This model resonates with Lee's (2019) [7] view that competence-based curricula in Asia have accelerated student readiness for rapidly evolving industries, suggesting that HIT's framework is globally relevant for emerging economies.

Comparative Framework: CDIO vs HIT Model

CDIO Model	HIT Model
Conceive	Conceive
Design	Design
Implement	Implement
Operate	Operate
nan	Commercialise/Spin-off

Operationalisation of Education 5.0

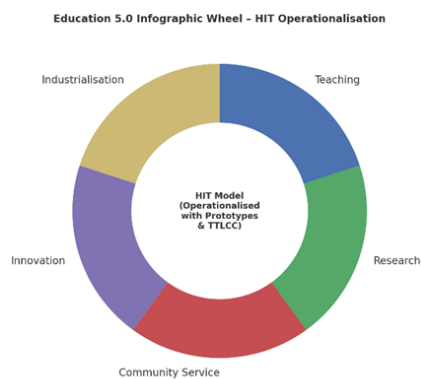


Figure 2 – HIT Operationalisation

Zimbabwe's Education 5.0 framework redefines higher education by mandating innovation and industrialisation alongside teaching, research, and community service (Chikoko, 2021) [4]. Many African universities have embraced this discourse at policy level but struggle with implementation (Teferra, 2014) [8]. HIT's Electronic Engineering Department is a rare example of operationalisation, as evidenced by its integration of student prototypes into the Technology Transfer, Licensing, and Commercialisation Centre (TTLCC). Kanhukamwe (2020) [5] underscores that "Education 5.0 requires a restructured pedagogy where innovation outputs are systematically linked to industrialisation pathways". The department's spin-offs and industrial collaborations exemplify this, bridging the gap between academic rhetoric and industrial practice in Africa.

Technopreneurship as a Pedagogical Driver.

The insistence on progressive prototype modules (HIT200 – HIT800) embeds technopreneurship into the curriculum as a non-negotiable component of engineering training. Unlike many institutions where entrepreneurship is taught as an optional add-on, HIT makes market readiness an assessment criterion. Min et al. (2019) [9] note that "technopreneurship education is positively correlated with the likelihood of student start-up formation". HIT validates this claim by producing graduates who have launched ventures in

automation, telecommunications, renewable energy, and biomedical applications *inter alia*. Rae (2006) [10] further argues that embedding entrepreneurship in higher education transforms universities into "breeding grounds for innovation-driven development". HIT's pedagogy therefore contributes a unique African model where entrepreneurial engineering is not supplementary but structurally integral.

Contribution to National and Regional Development.

HIT's responsiveness to national needs is evident in the launch of the Biomedical Engineering programme (2020), which bridges healthcare and engineering innovation. This aligns with Teferra's (2014) [8] assertion that African universities must serve as "engines of socio-economic transformation". Graduate outputs have influenced Zimbabwe's broader digitalisation agenda through employment in industry, academia, and start-ups. The contribution of HIT to healthcare engineering is particularly notable in a context where resource-constrained nations must localise technological solutions. Globally, similar responsiveness has been observed where universities link curricula with pressing societal challenges, as in the case of Industry 4.0 curricula in Asia and Europe (Sony, 2021) [12]. Thus, HIT demonstrates that mandate-driven institutions in Africa can shape national development trajectories.

Implications for Policy and Practice. The HIT model underscores that higher education reform in Africa must go beyond curriculum redesign to embrace innovation ecosystems that integrate pedagogy, research, and industrialisation. This finding aligns with Cloete & Maassen's (2013) [2] argument that African universities should be "developmental in mandate, not only academic in orientation". Policy-makers could adopt HIT's approach by institutionalising prototype-based progression models and mandating technology transfer centres within universities. At the same time, collaboration with global institutions experienced in scaling prototypes to industry such as those under the CDIO network could enhance HIT's impact. As Sony (2021) [12] argues, engineers in the 4IR/5IR era must be "technically competent, adaptive, and innovative in cross-disciplinary environments". Thus, HIT's model provides both a practical framework and a policy lesson for African and global higher education reform.

Future Prospects. Looking forward, HIT's expansion into MTech programmes positions it to contribute to postgraduate research in automation, telecommunications, and intelligent systems. With the global shift toward 5IR, characterised by human – machine collaboration and ethical technology, the department is strategically placed to align African engineering education with frontier developments. However, sustained success will depend on addressing gender equity, funding models, and regional collaboration to ensure long-term relevance and impact.

Conclusion. For two decades, the evolution of HIT's Electronic Engineering Department has shown

how mandate-driven, competence-based education can directly fuel national innovation and industrialisation. By embedding Education 5.0 principles from its inception and strategically expanding its programs—from a foundational BTech to specialized MTech degrees—the department has actively contributed to Zimbabwe's industrial agenda, proving responsive to evolving societal and technological needs. [4, 6, 12]. This trajectory reflects Crawley et al.'s [6] emphasis on experiential learning while also validating Sony's [12] call for curricula that prepare adaptive engineers for Industry 4.0 and 5.0.

Graduate outputs, start-up formation, and industrial collaborations confirm that HIT's prototype-driven pedagogy fosters technopreneurship in practice, echoing findings by Min et al. [9] that link entrepreneurship education to innovation-driven economic development. The department's contributions to key national sectors – including renewable energy, automation, telecommunications, and healthcare through biomedical engineering – show how engineering education can address pressing national challenges. This aligns with the view that African universities must be engines of development [8]. Gender imbalances (with only 17.3 % female undergraduates) mirror broader STEM disparities across Africa [19], while resource limitations and fragile pathways from prototype to full commercialisation constrain impact. As Rae [10] and others note, institutional entrepreneurship requires strong ecosystems, including financing and policy support, which remain underdeveloped in Zimbabwe.

Ultimately, the HIT model demonstrates that higher education institutions in developing contexts can successfully integrate pedagogy, innovation, and industrialisation when guided by a clear national mandate. It offers a replicable framework for other African universities aiming to move beyond

knowledge transmission toward socio-economic transformation through education, innovation, and enterprise creation [1, 2].

References

1. Africa's Knowledge Economies: Universities and Development / A. Tijssen [et al.] // Research Policy. – 2019. – Vol. 48, № 1. – P. 9–22.
2. Cloete, D. Roles of Universities in Development: African Perspectives / D. Cloete, P. Maassen // Higher Education. – 2013. – Vol. 65. – P. 117–131.
3. Government of Zimbabwe. HIT Act [Chapter 25:26]. – 2005.
4. Chikoko, C. Education 5.0 in Zimbabwe: A Framework for University Transformation / C. Chikoko // Zimbabwe Journal of Higher Education. – 2021. – Vol. 4, № 2. – P. 45–59.
5. Kanhukamwe, Q. Operationalising Education 5.0: The HIT Experience / Q. Kanhukamwe // Proceedings of Zimbabwe Universities Forum. – 2020. – P. 33–40.
6. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach / E. F. Crawley [et al.] // Springer, 2014. – 312 p.
7. Lee, J. Competence-Based Engineering Curricula in Asia / J. Lee // International Journal of Engineering Education. – 2019. – Vol. 35, № 2. – P. 431–440.
8. Teferra, T. African Higher Education and Development / T. Teferra // International Journal of African Higher Education. – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 25–48.
9. Technopreneurship Education and Start-Up Formation / M. Min [et al.] // IEEE Transactions on Education. – 2019. – Vol. 62, № 3. – P. 170–178.
10. Rae, D. Embedding Entrepreneurship in Higher Education / D. Rae // Education + Training. – 2006. – Vol. 48, № 6. – P. 518–531.
11. Schwab, K. The Fourth Industrial Revolution / K. Schwab. – World Economic Forum, 2016. – 184 p.
12. Sony, S. Preparing Engineers for Industry 4.0/5.0: Curriculum Adaptations / S. Sony // Journal of Engineering Education. – 2021. – Vol. 110, № 3. – P. 606–630.

UDC 681

AN ICT-ENABLED UNDERGROUND MINE SAFETY SYSTEM FOR COLLISION AVOIDANCE AND REAL TIME TRACKING Ruvimbo Samantha Chahwanda¹, Lovemore Gunda²

¹National University of Science and Technology, Bulawayo, Zimbabwe

²Midlands State University, Gweru, Zimbabwe

Abstract. Underground mining operations pose critical safety hazards which can be fatal. The ICT-enabled mine safety system discussed in this paper enables real-time monitoring of underground mining operations. RFID technology was utilized for real-time zonal localisation of miners and mobile equipment. GPS technology was incorporated for precise localisation. Echolocation technology was utilized for collision avoidance and alerts. A web application supported by a database is included to enable historical data acquisition as well as mining operations visualisation from a centralised control station. Implementation of this system demonstrates the potential for technology to significantly improve safety standards in the mining industry.

Keywords: mine safety, tracking, collision avoidance.

*Address for correspondence: Lovemore Gunda, Midlands State University, Senga, Gweru, Zimbabwe.
e-mail: gundal@staff.msu.ac.zw*

Introduction. The mining industry has been considered as one of the industries with the highest occupational mortality rate and injuries [1]. The mining environment is characterized by complex and hazardous operations that present critical safety hazards which can lead to collisions between mobile

equipment and humans or other mobile equipment causing injuries and fatalities [2]. Poor visibility in underground mines can arise due to darkness, short lines of sight and dust concentration [3].

The Safety System Building Blocks. Sensors and modules embedded on load-haul-dumpers (LHD) and

personnel's personal protective equipment, software in the form of a web application and a database as well as GPS and WIFI links make up the system. An ESP32 module was used a microcontroller and Wi-Fi shield for wireless communication between hardware sensors and the remote web application for display and monitoring.

Modules Used. The RC522 RFID module was used for unique identification of miners and automobiles as well as zonal localisation. A NEO-6M GPS Module was used for precise location and L298N motor driver module with an output of 12V was implemented to effect and control motion of 5V DC geared motors of the prototype underground automobile unit.

Sensors Used. An HC SR04 ultrasonic proximity sensor was used for echolocation for collision avoidance and detection.

Output Hardware. An I2C Liquid Crystal Display displayed status updates in characters for equipment operators on the situational awareness around the LHD. Piezoelectric buzzers gave audio alerts while light emitting diodes gave visual alerts. A personal computer was used to host the database and the web application.

Microcontroller. The ESP32 was used as the core controller as well as the WIFI shield for wireless communication between the hardware sensors and the web application for display and monitoring purposes [4].

System Development. The system was developed in three sections which are; web application, tracking system and collision avoidance system

Web Application. The web application was developed on Visual Studio. The application was designed and built using HTML, CSS and JavaScript.

Tracking System. The tracking of personnel and automobiles was achieved through radio frequency identification and the Global Positioning System. Personnel and automobiles were tagged using passive RFID tags that held unique identification. Each zone was allocated an RFID reader which transmitted information of activities of the respective zone to a host computer in a control room via a web application. The control room operator is able to identify which individual or LHD entered or exited a particular zone. Every activity is recorded in a database for future reference or action. A NEO-6M GPS module was interfaced to give the actual latitude and longitude coordinates of automobile or personnel.

Collision Avoidance. Collision avoidance for the underground safety system was achieved through echolocation technology implemented using the HC-SR04 Ultrasonic sensor.

Results. Figure 1 shows the underground automobile LHD unit prototype used to demonstrate the concept.

Real Time Tracking and Location. RFID readers scanned RFID tags, registered tags had their unique identifications displayed on the LCD. GPS coordinates were delivered to the server and zoning was determined depending on which zone has been entered or exited by a particular tag.

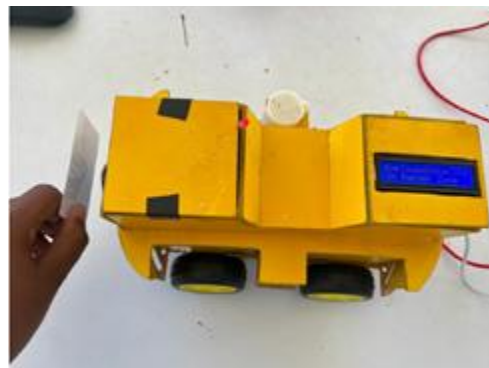


Figure 1 – The underground automobile LHD unit prototype

Integrated Safety System. Figure 2 below shows a series of successful tracking tests carried out as displayed on the web application interface. The system only displayed statistics of registered employees or automobiles.

Figure 3 shows collective data on reporting of safety breaches by a particular automobile or employee. It gives an account of each employee or automobile's accumulated safety breaches.

NAME	SAFETY	DISTANCE	LOCATION	LOCATION STATUS	SIGNAL STATUS	DATE
PERSONNEL 01	SAFE	100.00m	Zone 1	Active	Green	2023-10-27 10:00:00
PERSONNEL 02	SAFE	150.00m	Zone 2	Active	Green	2023-10-27 10:05:00
PERSONNEL 03	SAFE	200.00m	Zone 3	Active	Green	2023-10-27 10:10:00
PERSONNEL 04	SAFE	250.00m	Zone 4	Active	Green	2023-10-27 10:15:00
PERSONNEL 05	SAFE	300.00m	Zone 5	Active	Green	2023-10-27 10:20:00
PERSONNEL 06	SAFE	350.00m	Zone 6	Active	Green	2023-10-27 10:25:00
PERSONNEL 07	SAFE	400.00m	Zone 7	Active	Green	2023-10-27 10:30:00
PERSONNEL 08	SAFE	450.00m	Zone 8	Active	Green	2023-10-27 10:35:00
PERSONNEL 09	SAFE	500.00m	Zone 9	Active	Green	2023-10-27 10:40:00
PERSONNEL 10	SAFE	550.00m	Zone 10	Active	Green	2023-10-27 10:45:00

Figure 2 – Live Data Tracking

NAME	SAFETY	DISTANCE	LOCATION	LOCATION STATUS	SIGNAL STATUS	DATE
PERSONNEL 01	SAFE	100.00m	Zone 1	Active	Green	2023-10-27 10:00:00
PERSONNEL 02	SAFE	150.00m	Zone 2	Active	Green	2023-10-27 10:05:00
PERSONNEL 03	SAFE	200.00m	Zone 3	Active	Green	2023-10-27 10:10:00
PERSONNEL 04	SAFE	250.00m	Zone 4	Active	Green	2023-10-27 10:15:00
PERSONNEL 05	SAFE	300.00m	Zone 5	Active	Green	2023-10-27 10:20:00
PERSONNEL 06	SAFE	350.00m	Zone 6	Active	Green	2023-10-27 10:25:00
PERSONNEL 07	SAFE	400.00m	Zone 7	Active	Green	2023-10-27 10:30:00
PERSONNEL 08	SAFE	450.00m	Zone 8	Active	Green	2023-10-27 10:35:00
PERSONNEL 09	SAFE	500.00m	Zone 9	Active	Green	2023-10-27 10:40:00
PERSONNEL 10	SAFE	550.00m	Zone 10	Active	Green	2023-10-27 10:45:00

Figure 3 – Underground Tracking Data

Figure 3 illustrates in real time accumulation of times an automobile or employee encroached either the danger zone or alarm zone as well as their location in real time. It aids in identification of potential workplace hazards and risks in particular LHD operators and employees, safety breach forms can be issued to serial offenders.

Discussion And Conclusion

In this paper, an underground mine safety system for collision avoidance and real time tracking that uti-

lizes various sensors and modules to obtain and display data in real-time has been. The safety system stands out on integrating collision avoidance and real time tracking into one system that can be implemented in underground mines to improve on safety in the workplace. By embedding the safety system on an LHD the risks associated with underground mining can be improved and productivity can be increased.

References

1. Nielsen, K. Localization of Autonomous Vehicles in Underground Mines / K. Nielsen. – Linköping: Linköping University, 2023. – 187 p.

2. Green, W. J. Human detection for underground autonomous mine vehicles using Thermal Imaging / W. J. Green // 26th International Conference on CAD/CAM, Kuala Lumpur, Malaysia, July 2011: proceedings. – 2011. – P. 134–142.

3. Zhang, M. H. Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines / M. H. Zhang // International J. of Mining Science and Technology. – 2023. – № 5. – P. 567–578.

4. ESP32 Series Datasheet: version 4.7 / Espressif Systems. – Shanghai: Espressif Systems, 2020. – 47 p.

UDC 681

EARLY CATTLE DISEASE AND OESTRUS CYCLE DETECTION USING IOT

Pius Matemarunda, Sam Masunda, Silence Madondo

University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe

Abstract. This project addresses significant economic losses in dairy farming due to late disease diagnosis and poor oestrus cycle detection, issues particularly challenging for resource-limited farmers. The developed system leverages IoT technology, sensors (including temperature, heart rate, and movement), and a connected camera to monitor dairy cow health and behavioural parameters in real-time. This approach enables proactive disease detection and accurate oestrus cycle identification, facilitating prompt intervention and optimizing breeding management. Studies indicate the system achieves a 98 % decrease in disease detection time and a 95 % increase in oestrus detection accuracy compared to traditional methods. This promises enhanced agricultural productivity.

Keywords: IoT, cattle monitoring, disease detection, oestrus cycle, sensors.

Address for correspondence: Sam Masunda, University of Zimbabwe, P.O. Box MPI67, Mt Pleasant, Harare, Zimbabwe

e-mail: smasunda@ceic.uz.ac.zw

Introduction. The integration of sensing technologies and wireless networking protocols within the framework of the Internet of Things (IoT) is fundamentally transforming Precision Livestock Farming (PLF). This shift addresses the critical challenge of late disease detection and missed breeding opportunities, which often result in substantial economic losses in dairy farming. Traditional methods relying on visual inspection and conventional laboratory tests are often limited by staff availability and can lead to delayed treatment and increased disease spread.

The automated IoT-based monitoring system showcased aims to provide robust, real-time supervision of dairy cow health and the oestrus cycle. Studies supporting this approach indicate that utilizing IoT technology has resulted in a 98 % decrease in the time required for disease detection compared to traditional methods, facilitating early intervention. Additionally, the system has demonstrated a 95 % increase in the accuracy of oestrus detection, leading to improved breeding efficiency and higher milk production rates. This technology allows farmers to continuously monitor physiological parameters and behavioral patterns to identify abnormal trends or deviations before diseases progress [1].

IoT Architectures and Data Acquisition in PLF. The foundation of the system relies on carefully selected components designed for compatibility, efficiency, and size. The main controller is the ESP32-

WROOM-32 microcontroller, chosen for its versatility, integrated Wi-Fi and Bluetooth Low Energy (BLE), and capacity to manage inputs from various sensors. The module features a scalable dual-core processor.

The system integrates several sensors to gather comprehensive data as shown in Figure 1:

GPS Module (NEO 6M): Tracks the cattle's geo-location. Comparisons of GPS receivers indicate that signal propagation critically influences precision.

Temperature Sensor (DHT11): Measures body temperature, noted for high precision and interference resistance.

Heart Rate Sensor (MAX30100): Monitors pulse oximetry and heart rate.

Vibration Sensor (SW 18010P): Detects changes in animal activity levels, which signal potential disease or welfare concerns.

Connected Camera (ESP32-CAM): Provides visual data capture capabilities. These components form wearable devices, such as collars, that continuously collect data on vital signs and movement patterns. Real-time data collected by the sensors is analyzed for anomalies and transmitted to a cloud storage system (Firebase).

The system uses the GSM module (SIM800L) to send timely SMS alerts and notifications to the farmer via a dedicated mobile application. The microcontroller utilizes the GSM network and the mobile applica-

tion to inform the farmer instantly of any abnormalities. Furthermore, LED indicators and a piezo buzzer are included to provide instant local alerts to on-site farm employees, ensuring intervention even if the farmer's phone is off.

Oestrus and Disease Detection Mechanisms.

The system's primary objective is the accurate and early identification of impending health crises and reproductive readiness.

Early Disease Detection: Early detection is essential for maintaining herd health, reducing [2] economic losses, and minimizing the spread of contagious diseases, especially major threats in Zimbabwe like Lumpy Skin Disease (LSD), Foot and Mouth Disease (FMD), anthrax, and tick-borne diseases [2]. The system monitors continuous data points like body temperature, heart rate, and activity levels to identify deviations from the norm, allowing prompt intervention before diseases advance. For example, a temperature detected above the normal cattle body temperature triggers an alert. Detecting health issues early minimizes treatment costs [3].

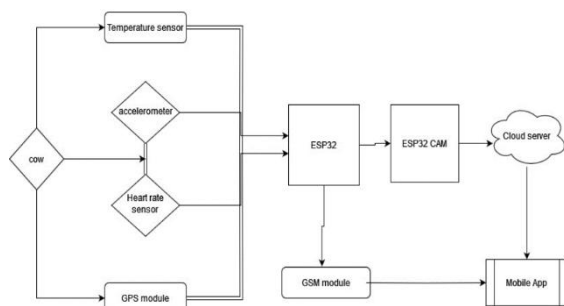


Figure 1 – System design flow chart

Oestrus Cycle Detection: Efficient reproductive management hinges on accurately detecting the oestrus cycle. This is crucial because the optimal window for successful breeding or artificial insemination lasts only 12 to 18 hours every 21 days. The system monitors changes in behavior, activity levels, and other physiological indicators to accurately predict oestrus. The system specifically aims to detect levels of excitement and movement consistent with oestrus. Using IoT-based systems for accurate detection helps to

reduce costs associated with reproductive hormones and unnecessary inseminations. The system utilizes data analysis to match collected data with already-known symptoms of certain diseases or indications of oestrus cycles.

Implementation Challenges and Future Directions. The practical implementation of IoT-based monitoring systems faces notable challenges. These limitations include budget constraints and reliance on stable internet connectivity and infrastructure, particularly in remote or rural areas. Obtaining cooperation from dairy farms to provide information and statistics due to security and privacy policies can also be a limitation.

A key technical challenge encountered during prototype testing was the presence of system noise, resulting in sensor value fluctuations. This noise stemmed from integrating components manufactured by different vendors, potentially utilizing different signal processing values.

To mitigate noise and ensure accurate functioning, future development should focus on standardizing the signal processing values used by all integrated components. Architecturally, future research recommends investigating the integration of Edge-Fog-Cloud computing for precise and quick outcomes in disease prediction and reproductive cycle tracking, based on promising models in smart healthcare. Additionally, leveraging advanced data analysis techniques, specifically Machine Learning (ML), is advised for early disease identification and risk prediction in dairy herds.

References

1. An Advanced Health Monitoring Device For Treating Chronic Diseases Using IoT / A. N. Prasath [et al.] // *Int. J. of Mechanical Engineering*. – 2022. – 7, № 5. – P. 45–53.
2. Woldegiorgis, K. W. Estimation of Non-Genetic Parameters for Reproduction and Production Traits of Holstein Friesian Dairy Herd at Elfora Cheffa Dairy Farm, Amhara Region, Ethiopia / K. W. Woldegiorgis, Y. Mengesha, A. H. Gebele // *Journal of Agricultural Science*. – 2020. – № 8. – P. 112–125.
3. Deployment of an intelligent and secure cattle health monitoring system / A. Jehangir [et al.] // *Egyptian Informatics Journal*. – 2023. – № 2. – P. 265–275.

UDC 681

A REVIEW OF MODERN INTELLIGENT AND ENERGY-EFFICIENT TOBACCO CURING SYSTEM

Munyanduri Tapiwanashe P., Makusha Didymus T.,
Chimonyo K. B., Rushambwa M. C.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. The article reviews the core technological components that enable intelligent and energy-efficient control of modern tobacco curing systems. Traditional flue-curing is a highly energy-intensive process relying heavily on subjective manual control, leading to high fuel consumption and variable leaf quality. This review focuses on the integration of Machine Vision (MV), specifically Convolution Neural Networks (CNN), automated leaf recognition and Fuzzy Logic Control for precise barn parameters, that is temperature and humidity. The Specific Energy Consumption (SEC) is analysed. The paper concludes that intelligent systems offer a significant pathway to minimize operational cost ensuring uniform, high-quality cured tobacco.

Keywords: machine vision, tobacco curing, deep learning, fuzzy control, energy efficient.

Address for correspondence: Munyanduri., Harare Institute of Technology, Belvedere, Harare, Zimbabwe
e-mail: tp.munyanduri27@gmail.com

Introduction. The accuracy of curing is a major factor in the value of flue-cured tobacco. To produce the desired chemical and physical qualities of the leaf, the controlled drying process known as flue-curing is essential. The farmer's subjective evaluation of leaf colour is currently the main determinant of this procedure. This process has three distinctive stages: yellowing, colour-fixing and stem-drying.

Given that conventional wood-fired barns are renowned for their energy inefficiency, this results in uneven quality and significant energy waste. They greatly increase the cost of production and deforestation. In response, modern agriculture engineering has shifted towards intelligent and automated systems to standardize leaf quality and to critically reduce SEC. This paper reviews foundational mathematical models that underpin these intelligent, energy-efficient tobacco curing systems.

System Architecture and Methodology. The intelligent tobacco curing systems architecture has three functional layers: the Sensing and Vision layer, the Control and Processing layer and the Actuation layer.

Sensing Layer and Vision Layer. This is the layer that is responsible for gathering real-time data in the environment.

Environmental Sensors: Digital temperature and humidity sensors (dry-bulb and wet-bulb) are strategically placed around the curing chamber to monitor air conditions, that is the temperature and humidity.

Machine Vision Module: A low-cost camera is installed in the barn to capture high-resolution images of the tobacco leaves. These images of the tobacco leaves are processed on an Edge Computing device (Raspberry Pi or ESP32-CAM module) to minimize latency.

Deep Learning Module: A custom-trained Convolution Neural Network (CNN) is installed on the edge device. This installed model is trained on a dataset of images. The dataset of images is captured under actual bulk curing barn conditions to classify the leaves into distinct stages. The stages are yellowing, browning and drying degrees. This classification replaces the subjective human eye observation.

The success of the image recognition model, is critical for real-time process control.

Control and Processing Layer. The fundamental of the intelligence of the system is in the control system. The objective is to adjust the environmental set-points (temperature and relative humidity) in the barn based on the output of the Machine Vision module.

Fuzzy Logic Control (FLC): A fuzzy logic controller is implemented on a microcontroller. FLC is ideal because the curing process inherently involves precise, linguistic and experiential rules for example "If leaf is mostly yellow and humidity is too low, then slightly increase the humidity setpoint".

Input Variables for FLC: current curing stage (from MV module), current temperature and current relative humidity.

Output Variables for FLC: The outputs are control signals sent to actuation layer such as Heater Duty Cycle Adjustment and Ventilation Damper Angle.

The controller identifies the curing stage by colour and environmental parameters and adjusts temperature, humidity and ventilation to prevent color defects, thereby improving quality and market value of the cured tobacco.

Actuation Layer. This layer has electromechanical system that executes the controller's commands to maintain the optimal curing environment.

Heater/Blower System: An electrically controlled heat source and a conventional fan are used to circulate and adjust and control the temperature of the air in the barn.

Automated Dampers/Vents: Stepper motors or servo-actuators automatically adjusts the fresh air intake and exhaust vents. Controlling these vents is important so as to prevent over ventilation which can waste significant heat during the final curing stages.

Energy Efficiency and Sustainability

Fuel Reduction. By precisely matching the heat and ventilation to the leaf's actual requirements, the FLC minimizes heat loss, which is particularly relevant given that traditional barns can lose up to 98.5 % of supplied energy. Continuous systems like tunnels can reduce coal consumption from 3–4 kg to 0.7 kg per kg of dry tobacco. The automated FLC system is expected to this efficiency even higher in small-to-medium scale bulk curers.

Conclusion. The evolution of tobacco curing from an art to a science is driven by the successful combination of Machine Vision (CNNs) for real-time quality assessment and Fuzzy Logic for adaptive human-like but precise control will improve product quality while promoting long-term environmental sustainability.

A significant measurable reduction in the fuel-to-tobacco ratio is realized compared to manually-operated conventional barns, directly addressing the national challenge of deforestation.

Acknowledgments.

I am grateful for the insightful guidance of my supervisor, Mr Didymus T. Makusha. I thank the Harare Institute of Technology (HIT) and the Belarusian National Technical University (BNTU) for co-organizing this conference and providing a platform for this research.

References

1. Zhang, H. Intelligent Tobacco Curing Control Based on Colour Control / H. Zhang, X. Jiang, S. Chen // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – № 8. – P. 2509–2513.
2. TCSRNet: a lightweight tobacco leaf curing stage recognition network model / P. Zhao [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1342567.
3. Intelligent and Accurate Tobacco Curing via Image Recognition and Data Analysis / B. Hu, Z. Meng, Y. Chen [et al.] // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 2023. – № 16. – P. 2330007.

4. Intelligent recognition of tobacco leaves states during curing with deep neural network / Q. Xu, Y. Zhang, A. Wang [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1453289.

5. Cundiff, J. S. Effect of exchange air rate on energy efficiency in tobacco curing / J. S. Cundiff // *Transactions of the ASAE*. – 1981. – Vol. 24. – P. 724–728.

UDC 681

IMPLEMENTATION OF ROBOTICS IN IMPROVING SAFETY AND EFFICIENCY IN MINING OPERATIONS

Last E Jinya¹, Doubt Simango¹, Musaidzi H.¹, Makusha D. T.²

¹Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, Zimbabwe

²Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Mining operations present hazardous conditions, particularly in post-blast environments where the accumulation of toxic gases poses significant risks to worker safety. This study presents a robotic system designed to autonomously navigate underground mining terrains and detect harmful gases such as methane, carbon monoxide, and carbon dioxide. The robot is built with a rocker-bogie mechanism for stability on uneven surfaces and uses IR sensors for obstacle detection. Gas detection is carried out using a sensor-integrated circuit. A GSM module is used to transmit the gas concentration data to surface-level receivers. Simulation results confirmed the robot's capability to navigate autonomously and detect gas presence with reliable accuracy.

Keywords: Autonomous Robot, Gas detection, Underground Mining, GSM communication.

Address for correspondence: Doubt Simango, Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe
e-mail: dsimango@cut.ac.zw

Introduction. Underground mining remains one of the most hazardous industrial activities, especially in the post-blasting phase, where the presence of toxic gases poses serious risks to worker safety and operational efficiency. Commonly encountered gases such as methane (CH₄), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO₂) are not only dangerous due to their toxicity but also because they are difficult to detect without specialised equipment (Bakshi, 2021). The traditional practice of manually inspecting mine shafts and tunnels after blasting exposes workers to unnecessary risks, delays in decision-making, and reduces productivity. As mining operations increase in scale and complexity, there is a growing demand for intelligent, automated systems that can navigate hazardous environments and gather essential environmental data without human intervention (Patel, 2023).

This paper focuses on the design and development of a robotic system tailored for underground mining applications. The system integrates three core technologies: a rocker-bogie mobility mechanism, a gas detection circuit, and a wireless GSM communication module. The rocker-bogie system was selected due to its proven ability to traverse uneven terrain Ahmad (2022). It ensures that the robot maintains ground contact with all wheels, improving stability and traction in debris-laden or rugged underground surfaces. For autonomous navigation, the Probabilistic Roadmap (PRM) algorithm was implemented in MATLAB to simulate safe path planning in a cluttered environment.

Methodology. The methodology adopted for this project focuses on the design, simulation, and integration of key subsystems that enable the mining robot to operate autonomously in hazardous underground environments. These include the mechanical mobility system, the path planning algorithm, gas sensing circuitry, GSM-based communication, and embedded programming. The robot's chassis was developed using a rocker-bogie suspension system.



Figure 1 – Rocker-bogie mechanism

To enable autonomous navigation, the Probabilistic Roadmap (PRM) algorithm was implemented in MATLAB. The environment was modelled with obstacle maps representing underground tunnels. The output was a smooth, collision-free path that the robot could follow. The algorithm's effectiveness was visualised through simulated maps that displayed node generation, obstacle inflation, and final path selection.

The robot's sensing system included three key sensors MQ-4 for methane, MQ-7 for carbon monoxide and MG-811 for carbon dioxide. These sensors were integrated into a circuit designed in Proteus software. Each sensor's analogue output was connected to the Arduino Mega microcontroller for real-time gas concentration reading. Voltage dividers and signal conditioning circuits were included to stabilise readings and reduce noise interference.

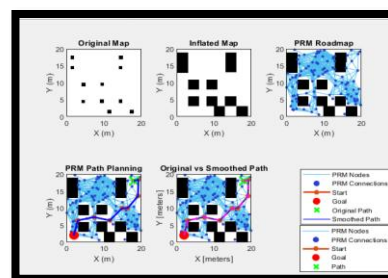


Figure 2 – PRM path planning simulation results

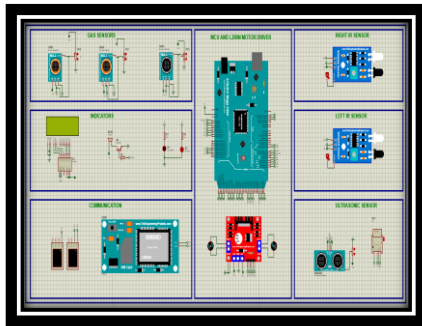


Figure 3 – Gas sensing circuit design in Proteus

A GSM module (SIM800L) was used to wirelessly transmit gas concentration readings to a surface receiver via SMS. The GSM module was programmed to send alerts when gas levels exceeded defined thresholds. This ensures that gas data can be monitored remotely without relying on continuous human presence underground

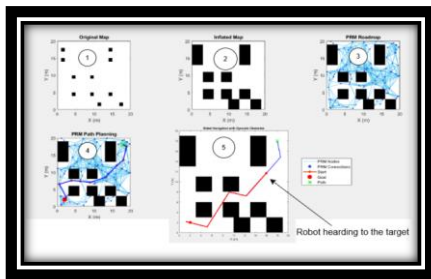


Figure 4 – PRM path planning output

The Arduino was programmed using the **Arduino IDE** to read gas sensor values, compare them to threshold limits, and trigger the GSM module for communication.

Results and Discussion. The performance of the proposed robotic system was evaluated through both simulation and partial hardware validation. The main focus was to assess the robot's ability to navigate autonomously, detect hazardous gases, and communicate data using the integrated GSM module.

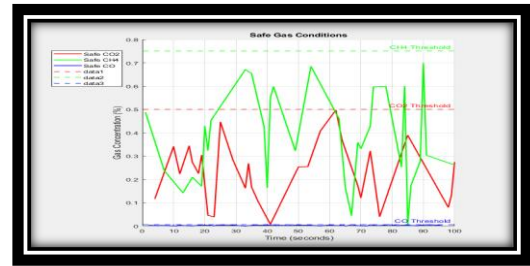


Figure 5 – Gas concentration levels

The simulation results indicate that the proposed robotic system is functionally viable for underground mining applications

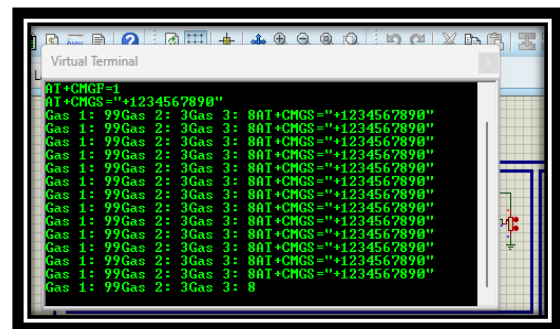


Figure 6 – GSM communication

Conclusion. This project demonstrated the design and simulation of a robotic system capable of improving safety and efficiency in underground mining operations.

References

1. Ahmad, S. Advanced rocker-bogie mechanisms for extreme terrain mobility / S. Ahmad, W. Zhang // Journal of Field Robotics. – 2022. – Vol. 39, № 3. – P. 245–261.
2. Real-time gas detection in underground mines using MOS sensors / T. Bakshi, R. Kumar, S. Yamamoto [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, № 14. – P. 15642–15652.
3. Autonomous navigation in GPS-denied mines / H. Patel, M. Chen, K. Tanaka [et al.] // Autonomous Robots. – 2023. – Vol. 47, № 2. – P. 245–259.

UDC 681

DESIGN AND EVALUATION OF A GPS-GSM BASED IOT TRACKING DEVICE FOR PERSONAL AND ASSET TRACKING

Didymus T. Makusha, Hazel V. Makuwa,
Tapiwanashe Munyanduri, Rushambwa M. C., Chimonyo K. B.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Trackers play a crucial role in society by enabling individuals and organizations to monitor and manage their assets, resources, and activities more effectively. For people, companies, and organizations to safeguard their valuables against theft and to prevent unauthorized access, asset security is essential. This is why trackers are used. Trackers provide real-time information on the whereabouts of vehicles, goods, and even individuals, helping to prevent theft, locate missing persons, and respond to emergencies quickly and efficiently. This research study focuses on developing a low-cost tracking system based on internet of things (IoT) which is the process by which inanimate objects gather, process, and transmit environmental data, then use the internet to send the information to a receiver. The device is made up of Global Positioning System (GPS) and Global System for Mobile communications (GSM) modules.

Keywords: GPS, IoT, GSM, Tracking, real-time.

Address for correspondence: Didymus T. Makusha, Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe.
e-mail: dmakusha@hit.ac.zw

Introduction. There is a growing need for a cost-effective IoT based tracking system to address the rising occurrences of thefts. Traditional tracking systems are often expensive and not accessible to everyone. There is a demand for a solution that can provide real-time tracking and monitoring of assets at a more affordable price point.

Scope of Study. This project aimed to develop a cost effective IoT based tracking system using GPS and GSM technology to address theft prevention. The system will allow users to track and monitor their assets in real-time through a mobile application. The device was also able to send its location to the user even in areas of poor network through SMS. The objectives include designing a cost-effective tracking device, integrating GPS and GSM technology, developing a user-friendly software platform, implementing alert mechanisms, and conducting testing for validation.

System Requirements. These are the main components of the project

GPS module. The NEO-6M GPS module works by using a SAW filter and an RF front end with integrated LNA and a baseband processor to process the signals. The module communicates with the Arduino via serial communication using the TX and RX pins. The NEO-6M GPS module is a variant of the GPS receivers supplied by u-Blox and operates from 2.7 V to 3.6 V.

GSM module. The working principle of GSM is as follows. Mobile Device (Cell Phone) sends and receives signals to/from the nearest Cell Tower (Base Station). The Base Station forwards the signals to the Mobile Switching Center (MSC). The MSC connects the call to the Public Switched Telephone Network (PSTN) or another mobile network. The PSTN routes the call to the destination phone. The process is reversed for receiving calls. GSM uses TDMA (Time Division Multiple Access) for multiplexing, and GPRS (General Packet Radio Service) for data transmission. Its working voltage is 3.4 V to 4.4 V.

ESP8266. The ESP8266 Wi-Fi module is a System On-Chip (SOC) that can handle Wi-Fi network functions and can be used as a standalone wireless transceiver. The ESP8266 Wi-Fi module can run in either slave or standalone mode. When running as a slave to a microcontroller host, the ESP8266 Wi-Fi module can be used as a Wi-Fi adapter for any microcontroller using UART or SPI. When running as a standalone application, the ESP8266 Wi-Fi module can provide both microcontroller and Wi-Fi network functions. Its working voltage is 3.3 V to 5 V.

Power Supply (Li-Po Battery).

A rechargeable battery for powering the device.

Mobile App.

For remote tracking and monitoring, providing a user interface to view location data and device status.

Methodology. The GPS module detects the location of the device and sends the coordinates to the microcontroller. The microcontroller (ESP8266) is the

processor. It sends the coordinates to the mobile application via the internet where the location is viewed on a map. The GSM is the alternative way to get location when the device is in remote areas with poor connectivity. The GSM sends a text of the coordinates of the device upon request.

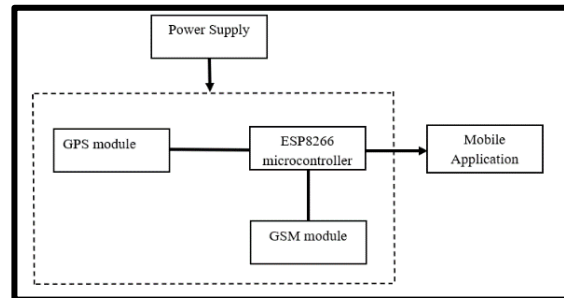


Figure 1 – System block diagram

Software development. ThingSpeak was used to collect data from the microcontroller. ThingSpeak is an open-source Internet of Things (IoT) platform that allows users to collect, store, and analyse data from sensors and devices. It provides a cloud-based infrastructure for IoT applications, enabling users to collect data from sensors and devices, store data in a cloud-based database and share data with others using web APIs and dashboards.

MIT app Inventor was used to design my mobile application. MIT App Inventor is a platform for creating mobile apps for Android devices. App Inventor allows users to build apps using a visual programming language, called "blocks", which is based on Scratch.

Results. System Behaviour analysis. The ESP8266 microcontroller worked as expected and executed its commands well.

The Neo 6m GPS worked well and could locate coordinates well.

The SIM800L GSM did displayed a few challenges due to its slow response time. The SIM800L processes AT commands, which can take some time to execute. The module needs to parse the commands, perform the required actions, and then respond, which can lead to delays. The SIM800L has limited processing power and memory, which can lead to slower response times when handling complex tasks or multiple connections.

Conclusion. It was successfully accomplished to use a GSM and GPS in conjunction with an ESP8266 microcontroller. Since the objectives in section 3.4 were achieved and the outcomes were mostly in line with expectations, the project was a success.

Table 1

Description	Results
When the microcontroller is supplied with 5V (its working voltage)	The application updates and shows the current location. The GSM module had a quite slow response due to network inefficiencies.

Recommendations. The SIM800L GSM module is a 2G module and 2G networks have slower data transfer rates compared to newer networks. Therefore, minimizing the number of AT commands and optimizing the command sequence and a good-quality antenna can improve its functioning.

Upgrade to a more advanced GSM module (e. g., 4G, 5G) for faster data transfer and better coverage.

Use a more advanced GPS module or a GNSS module for better accuracy.

Integrate additional sensors e. g. accelerometer to collect more data and enhance tracking capabilities

References

1. Mugauri, C. Low Cost IoT Based Livestock Tracking System for Zimbabwe / C. Mugauri // International Journal of Science and Research. – 2020. – № 12. – P. 123–130.
2. A Wearable GPS-GSM Device for Elderly Individuals / J. Li, W. Zhang, H. Wang [et al.] // Journal of Healthcare Engineering. – 2018. – Art. 1234567. – P. 1–8.
3. GPS-GSM Asset Tracking System for Industrial Equipment / K. Tripathi [et al.] // Int. Journal of Industrial Engineering and Technology. – 2019. – № 1. – P. 1–8.
4. GPS-GSM Based Smart Shoe for Athlete Performance Tracking / M. A. Al-Shammari [et al.] // International Journal of Sports Science and Technology. – 2020. – Vol. 2, № 1. – P. 1–8.
5. Oliveira, R. An Intelligent Model for Cargo Tracking based on off-the-shelf Mobile Devices / R. Oliveira // Expert Systems with App. – 2013. – № 6. – P. 2023–2031.
6. GPS-GSM Based Container Tracking System / S. K. Goyal [et al.] // International Journal of Logistics and Supply Chain Management. – 2018. – № 2. – P. 1–8.
7. GPS-GSM Based Vehicle Tracking System / S. S. Rao [et al.] // Int. Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2016. – Vol. 5, № 6. – P. 398–403.
8. Venkatakrishnan, V. Public transport ticketing and monitoring system / V. Venkatakrishnan, R. Seethalakshmi // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2012. – Vol. 38, № 1. – P. 45–52.

UDC 681

A PRAGMATIC AND ITERATIVE FRAMEWORK FOR MODERN EMBEDDED SYSTEMS PRODUCT DESIGN: A CASE STUDY OF A LORA-BASED SMART CITY TECHNOLOGY ENABLER

Dzapasi T. D., Chimonyo K. B., Duri R.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper presents an iterative framework for embedded systems design, validated through developing a third-generation LoRa-based smart city ecosystem. Traditional linear models fail to address manufacturing constraints and evolving requirements. The proposed framework integrates market benchmarking, manufacturer involvement, simulation, peer review, and data-driven iteration across six phases. Case study results show 68.4 % reduction in sleep current, 600 % range improvement, and 27.3 % cost reduction over three design cycles, achieving 99.2 % production yield. The approach bridges academic research and industrial production, providing a practical blueprint for developing reliable, market-ready IoT products even under academic setups.

Keywords: embedded systems, iterative design, LoRaWAN, smart city, IoT.

Address for correspondence: Dzapasi T. D., Postal Address Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe
e-mail: tdzapasi@hit.ac.zw

Introduction. The development of robust, market-ready embedded systems for IoT applications presents significant challenges that traditional linear design models often fail to address [1]. Common pitfalls include underestimating component sourcing impacts, overlooking Design for Manufacturability principles, and failing to validate designs against real-world constraints [2; 3]. The proliferation of IoT has fundamentally altered embedded systems design, moving from isolated devices to interconnected nodes within larger cyber-physical systems [4].

This paper addresses these gaps through a disciplined, iterative framework developed during three-cycle development of a LoRa-based smart city technology enabler. Technologies like LoRaWAN have emerged as key enablers for smart city applications due to their exceptional link budget and low power consumption [5], yet the path from functional prototype to production remains fraught with obstacles seldom addressed in academic curricula.

Methods. The proposed framework consists of six iterative phases: (1) Benchmarking and specification target setting through market analysis and technical feasibility studies; (2) Early manufacturer establishment for supply chain integration; (3) Technical design and simulation including RF and power analysis; (4) Structured peer review; (5) Fabrication and systematic testing; (6) Performance documentation and re-specification [2].

The case study involved developing a LoRaWAN-based system architecture comprising battery-powered end nodes (STM32WL MCU, Semtech SX1276) and mains-powered gateways (i.MX6UL processor, Semtech SX1302) for smart city applications including waste management, environmental monitoring, and smart parking.

Results. Three design cycles demonstrated progressive improvement across key metrics. Sleep current reduced from 25 μ A to 7.9 μ A (68.4 % improvement), communication range increased from < 500 m

to 3.5 km (600 % improvement), and BOM cost reduced from \$22 to \$16 (27.3 % reduction). Production yield reached 99.2 % in the final iteration.

Discussion. The iterative framework's effectiveness stems from four key factors: rigorous documentation enabling data-driven decisions, early manufacturer involvement preventing DFM issues, peer review identifying potential failures, and simulation-guided design replacing guesswork. Each cycle systematically addressed previous shortcomings, transforming initial prototypes into production-ready products [4; 5].

Table 1 – Performance improvement across design cycles

Parameter	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Improvement
Sleep Current	25 μ A	8.5 μ A	7.9 μ A	68.4 %
Range	< 500m	1.8 km	3.5 km	600 %
BOM Cost	\$22	\$16.50	\$16.00	27.3 %

The approach demonstrates strong parallels with agile methodologies while accommodating hardware constraints. By breaking development into manageable iterations, the process mitigates technical and financial risks while ensuring continuous progress toward market-ready systems.

Conclusion. The iterative framework successfully bridges academic research and industrial production, providing a practical guideline for developing reliable embedded systems. Future work involves

deploying pilot networks for long-term reliability data and applying the framework to Linux-based gateway systems with edge-computing capabilities.

Acknowledgments. The authors acknowledge the support of Harare Institute of Technology in facilitating this research.

References

1. Royce, W. W. Managing the Development of Large Software Systems / W. W. Royce // Proceedings of IEEE WESCON. – 1970. – Vol. 26. – P. 1–9.
2. SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed / L. Sanchez [et al.] // Computer Networks. – 2014. – Vol. 61. – P. 217–238.
3. Broy, M. Challenges in Automotive Software Engineering / M. Broy // Proceedings of ICSE. – 2006. – P. 33–42.
4. Internet of Things: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions / J. Gubbi [et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2013. – № 7. – P. 1645–1660.
5. Farahani, S. LoRa Wireless Networking / S. Farahani. – Hoboken: Wiley, 2019. – 412 p.
6. Embedded System Design: Modeling, Synthesis and Verification / D. D. Gajski [et al.]. – N.Y.: Springer, 2009. – 352 p.
7. Anderson, D. M. Design for Manufacturability: How to Use Concurrent Engineering to Rapidly Develop Low-Cost, High-Quality Products / D. M. Anderson. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 478 p.
8. Fitzgerald, J. Hardware/Firmware Interface Design: Best Practices for Modern Embedded Systems / J. Fitzgerald. – Waltham: Newnes, 2012. – 294 p.
9. SX1276/77/78/79 Datasheet: LoRa Long Range Low Power Wan RF Transceiver / Semtech Corporation. – Camarillo: Semtech Corporation, 2020. – 128 p.

UDC 681

INTEGRATED POULTRY ENVIRONMENTAL MONITORING AND CONTROL SYSTEM WITH GSM ALERTS

Shemiyadi Purazeni, Didymus T. Makusha, Rushambwa M. C., Chimonyo K. B.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Poor environmental conditions such as elevated levels of ammonia and carbon monoxide pose serious problems for poultry production since they thwart optimum growth of chickens. An Atmega328p microcontroller based integrated monitoring and control system prototype is presented in this study. In addition to LCD displays and GSM alerts for farmers, sensors such as DHT11 for temperature and humidity MQ137, MQ7 for gases and real time clock allow real time detection of abnormalities triggering automated responses like heating or fan activation. Buttons are incorporated to allow the farmer to choose environmental parameters for a particular stage of growth of broiler. By using the real time clock, luminous hours are automated. Initial experiments provide dependable management within ideal parameters indicating scalable advancements in rural farming.

Keywords: Sustainable Agriculture, Real time control, GSM.

Address for correspondence: Didymus T. Makusha, Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe
e-mail: dmakusha@hit.ac.zw

Introduction. Poultry farming supports rural economies and global food security, particularly in underdeveloped nations where it improves nutrition and livelihoods. Exposure to high concentrations of ammonia and carbon monoxide for extended periods has serious consequences on human and poultry respiratory health [1]. However, environmental stresses such as excessive humidity, temperature extremes, ammonia from volatilized litter and carbon monoxide emitted from the inevitable use of charcoal braziers

endanger the health and wellbeing of birds. This leads to bird mortality, respiratory infections and slower growth rates. Traditional methods rely on manual checks which are labor-intensive and ineffective, and cause delays in interventions [2]. Currently in Zimbabwe no method is being used to monitor the level of these noxious gases.

This study demonstrates a low-cost prototype for a poultry environmental monitoring and control system powered by an Atmega 328p microcontroller.

It includes sensors such as DHT11 for temperature and humidity, MQ137 and MQ7 for ammonia and carbon monoxide, and a real time clock for accurate timing of luminous and dark hours. Real-time data processing by the system allows it to automate responses such as heating or fan ventilation, show metrics on an LCD, and give farmers GSM alerts so they can attend to recurring above threshold conditions.

Methodology. This study employed a prototype-based design approach to develop an integrated poultry environmental monitoring and control system, utilizing embedded systems engineering principles. The methodology encompassed hardware integration, software development and preliminary testing. **System Description.** The system consists of sensors which measure environmental variables in the chicken coop. The readings are transmitted to the microcontroller which has preset threshold values. When the measured variable is compared with the set value present in the controller and there is a deviation, the microcontroller will activate a respective actuator. The system incorporates different set points for temperature, humidity and lighting hours tailored to the broilers' age in weeks to optimize growth conditions throughout the six week growth period.

For temperature and humidity, a DHT11 sensor will measure the ambient temperature and relative humidity in the chicken coop, depending with the week, if there are any deviations in the preset temperature and humidity the controller will activate either a fan when the temperature is below set point or a fan when the temperature is above the set point.

When the humidity exceeds the threshold an extraction fan is switched on to pump out the stagnant vapor.

For ammonia and carbon monoxide gases, the gas sensors will detect and sent a voltage to the microcontroller. The voltage is converted to parts per million using the below formulas.

$$V_{OUT} = \frac{ADC \times 5}{1023} \quad (1)$$

$$ratio = \frac{V_{OUT}}{BASELINE} \quad (2)$$

$$ppm = 10 \log_{10} \left(\frac{ratio}{sensitivity} \right) - b. \quad (3)$$

The baseline is the raw analog reading produced by the sensor in clean air and b is the gradient of the line of reading of the particular gas from the datasheet. When the gas sensor reading are above the set point the controller will activate the extraction fan and simultaneously send a message to the user.

The real time clock keeps an accurate time and the controller will activate and deactivate lights depending with the preset timings. By using the controller eeprom, in case of power outages, the controller will read the week previously selected to maintain the prevailing conditions of that particular week and it also increments the week when seven days elapse.

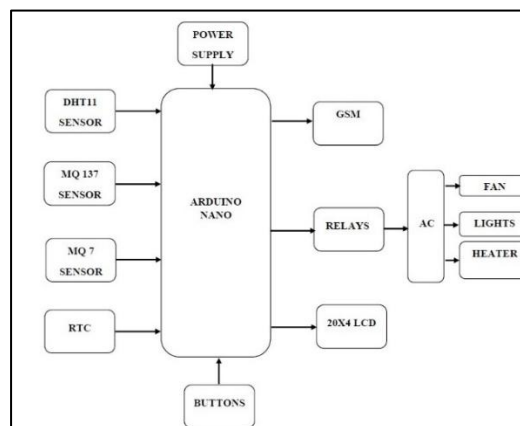


Figure 1 – System Block Diagram

Results. Below is the table of results obtained during the system test.

Table 1

Condition	Result
Temperature above set point	Fan turns on
Temperature below set point	Heater turns on
Humidity above set point	Extraction fan turns on
Gases levels above set point	Extraction fan turns on and text message is sent via GSM



Figure 2 – System on breadboard

Discussion. The prototype effectively maintains poultry conditions and managed to send text messages via GSM. Human intervention is reduced, ruling out the catastrophic effects of human error. The system is robust as it managed to perform optimally during stress testing.

Conclusion. This study developed a cost-effective Arduino Nano-based prototype for integrated poultry environmental monitoring and control system, enabling real-time parameter detection, automated corrections, LCD displays and GSM alerts tailored to broiler weekly growth stages. It reduces bird health risks, boosts productivity and reduce labour cost.

References

1. Carlile, F. S. Ammonia in poultry houses / F. S. Carlile // World's Poultry Science Journal. – 1984. – Vol. 40. – P. 99–113.
2. Dinrifo, R. R. Smart poultry farming using internet of things (IoT) / R. R. Dinrifo. – ResearchGate, 2023. – 15 p.

3. Ammonia production in the poultry houses and its harmful effects / I. U. Sheikh, A. A. Mir, S. A. Bhat [et al.] // International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry. – 2018. – Vol. 3, № 4. – P. 19–24.

4. Simon, L. C. F. Prototype of Smart Poultry for Small-Scale Poultry Farmers at Ilocos Norte / L. C. F. Simon,

T. Palaoag // International Journal of Research and Scientific Innovation. – 2024. – Vol. 11, № 5. – P. 456–465.

5. IoT based Poultry Monitoring System / U. Muthkumar, G. Gurukiran, Maheshwaran [et al.] // International Journal for Creative Research Thoughts. – 2020. – Vol. 8, № 6. – P. 234–241.

UDC 681

SOLAR POWER OPTIMIZATION - CASE STUDY

William Takudzwa Charewa, Rudo Duri

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. The rapid growth of solar photovoltaics has highlighted the need for effective strategies that maximize energy yield, improve reliability, and reduce lifecycle costs. This paper presents an integrated approach to solar power optimization that combines modelling, system design, and control techniques. Key areas addressed include module orientation and tracking, mitigation of soiling and shading losses, and the application of predictive algorithms for maximum power point tracking under variable irradiance. The study also explores techno-economic optimization through the coupling of solar generation with energy storage, enabling improved dispatchability and grid stability. The proposed framework provides a foundation for enhancing solar system performance and supports large-scale integration of renewable energy into modern power networks.

Keywords: solar photovoltaic, optimization, irradiance, renewable energy

Address for correspondence: William Takudzwa Charewa : Postal Address Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare
e-mail: williecharewa@gmail.com

Introduction. Solar energy is a leading renewable source, yet its effective utilization is constrained by shading, soiling, temperature variations, and fluctuating irradiance that reduce performance and complicate grid integration [1]. Traditional optimization methods such as solar tracking, maximum power point tracking, and storage integration have improved efficiency, but they often struggle with dynamic and uncertain operating conditions. Recently, machine learning algorithms have emerged as powerful tools for forecasting solar irradiance, predicting system faults, and enhancing real-time energy management. However, there remains a need for integrated approaches that combine these intelligent methods with technical and economic strategies to maximize efficiency and reliability [3]. This paper addresses this gap by presenting a framework for solar power optimization that leverages machine learning alongside conventional techniques to improve performance, reduce costs, and support large-scale renewable energy adoption.

Literature Review. Recent solar energy research highlights efforts to optimize system performance, ensure grid stability, and reduce building energy demand. Studies show that photovoltaic (PV) efficiency is highly sensitive to external factors; optimization via sun-following orientation can increase output by up to 40 %, while dust contamination can reduce performance by up to 75 % [2]. Accurate production modelling remains challenging, especially when systems utilize inverter clipping to comply with non-utility limits. Achieving 100 % renewable power requires firm-dispatchable generation capacity equivalent to over 100 % of average demand to balance VRE shortfalls. Implementing regional firm VRE strategies offers a solution by enabling a multifield increase in

Distributed PV (DPV) hosting capacity on local circuits. Simultaneously, building efficiency is addressed through passive strategies like integrating Phase Change Material (PCM) and insulation, achieving up to a 17.3 % reduction in cooling load [4]. This is critical for tackling energy equity, as thermal resilience studies indicate low-income households face disproportionately high peak cooling loads (up to 14.2 kW compared to high-income homes at 8.4 kW) during heatwaves [5]. Finally, policy optimization shows that achieving the lowest overall emissions is highly location-specific (e. g., 100 % solar vs. 100 % wind) and dependent on external factors like the PV panel's manufacturing origin, which directly affects its carbon intensity.

Solar Energy Losses And Challenges. Solar energy losses are influenced by a number of factors including environmental and technical factors. If these factors can be minimized, we can yield approximately the maximum possible power.

Environmental Factors.

The environment is the major contributing factor to the amount of harvested energy at any given time. These includes:

Temperature: Efficiency of solar panels relies on the temperature of the environment. As the temperature increases, efficiency decreases due to a reduction of semiconductor bandgap. This results in a significant drop in voltage hence a reduced overall power output.

Irradiance: This is the amount of solar energy received per unit area and is measured in (W/m²). If irradiance increases, current output also increases proportionally hence the overall power also increases.

Technical Factors. These are factors that come along with the components of the system that is either

the inverter, type of panels used. The inverter itself comes with its own losses. Other losses come from factors like mismatch losses:

Mismatch Losses: these are caused by variations in power ratings of mainly the solar panels, different shading of panels in the same strings and at times uneven dust or dirt on panels. The mismatch then results in reduction of current and voltage by the lowest panel in series and parallel connections respectively.

Inverter Losses: During the conversion of DC to AC, there are associated losses caused by heat as well as switching losses by MOSFETs or any switching device used. These losses contribute to the overall solar power losses.

The Drive for Energy Efficiency – Machine Learning.

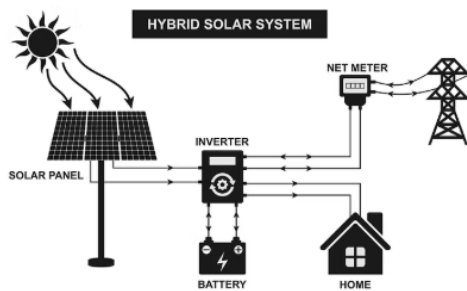


Figure 1 – A basic block diagram of the existing solar technology

The increasing global demand for clean energy has intensified the focus on maximizing the efficiency of solar photovoltaic (PV) systems. Energy efficiency in solar systems is critical not only for reducing the cost per kilowatt-hour but also for enhancing the reliability, longevity, and environmental sustainability of solar installations. Inefficiencies can arise from multiple sources, including suboptimal module orientation, shading, soiling, temperature fluctuations, and losses in inverters or wiring. Improving efficiency therefore requires both technological and operational innovations. Advances such as maximum power point tracking (MPPT), dual-axis solar tracking, and intelligent energy management systems have contributed significantly to performance gains. Recently, the integration of machine learning algorithms has opened new avenues for predictive maintenance, irradiance forecasting, and real-time system optimization, enabling PV systems to respond dynamically to changing environmental and load conditions. By driving energy efficiency, these innovations support higher energy yields, reduce operational costs, and facilitate large-scale adoption of solar energy as a sustainable power source. Machine learning algorithms enabled irradiance and power forecasting, fault detection and predictive maintenance as well as performance enhancement under different operating conditions.

Irradiance and Power Forecasting. Time-series models such as LSTM (Long Short-Term Memory) networks and gradient boosting methods predict short- and medium-term solar irradiance and power

output, enabling more reliable energy management and grid integration.

Fault Detection and Predictive Maintenance

Classification algorithms (e. g., SVM, decision trees) and anomaly detection models monitor system behaviour to identify degradation, inverter malfunctions, or module defects early, minimizing downtime and operational costs.

Performance enhancement under different operating conditions

Ensemble learning and deep reinforcement learning approaches enable solar systems to adaptively adjust to uncertainties such as weather fluctuations, soiling, and component degradation, improving both efficiency and reliability over long-term operation.

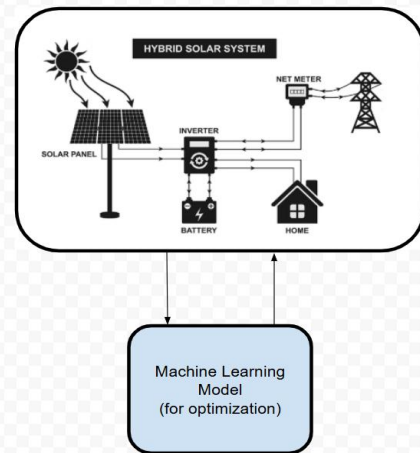


Figure 2 – The intended system block diagram

Innovations And Future Directions. Several overarching trends and innovations are shaping the future of green energy harvesting. Future directions involve the large-scale deployment of smart, autonomous solar systems capable of self-optimization and adaptive response to environmental changes. Integration with the smart grid, edge computing for real-time decision-making, and the development of circular economy practices for PV recycling are expected to play a major role. Continued research on scalable machine learning models, cost-effective storage integration, and resilient system architectures will drive the next generation of solar energy solutions, supporting global sustainability and energy transition goals.

Conclusion. Optimizing solar energy systems is critical to enhancing efficiency, reliability, and economic viability in the transition to renewable power. This paper has highlighted key strategies for solar power optimization, including conventional methods such as maximum power point tracking, solar tracking, and energy storage integration, as well as the emerging role of machine learning in predictive forecasting, intelligent control, and fault detection. By leveraging data-driven approaches, solar systems can dynamically respond to environmental variability and operational challenges, achieving higher energy yield and improved system resilience. The integration of

machine learning with traditional optimization techniques presents a promising pathway for large-scale, sustainable deployment of solar energy. Future work should focus on real-world implementation, multi-site validation, and continued refinement of intelligent algorithms to further enhance performance, reduce costs, and support the global adoption of solar power.

References

1. Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review / K. Hasan [et al.] // *Energy Science & Eng.* – 2022. – № 2. – P. 656–675.

2. Simulation-based optimization of window properties based on existing products / J. Wang [et al.] // *Proceedings of Building Simulation and Optimization 2016.* – 2016. – P. 234–241.

3. Centre for Scientific and Industrial Research (CSIR). CSIR releases statistics on power generation in South Africa for 2022. – Pretoria: CSIR, 2023. – 45 p.

4. Electricity Supply Commission (Eskom). Coal in South Africa: Eskom fact sheet. – Johannesburg: Eskom, 2021. – 28 p.

5. Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials / J. Wang [et al.] // *Building and Environment.* – 2019. – Vol. 151. – P. 187–197.

UDC 681

SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER FOR MPPT CHARGE CONTROLLER

Lusani Y. Ndlovu, Kudzai B. Chimonyo, Tanaka Dzapasi, Didymus T. Makusha

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper presents the design, simulation, and experimental validation of a synchronous buck converter for maximum power point tracking (MPPT) charge controllers. Conventional buck converters suffer from diode conduction losses that reduce efficiency, particularly in low-voltage, high-current applications. By replacing the diode with a synchronously controlled MOSFET, the proposed converter achieves reduced power loss, smoother current transfer, and enhanced overall efficiency. A half-bridge topology incorporating bootstrap driving, inductor-based energy storage, and capacitor filtering was developed and tested. Both simulation and prototype results confirm stable operation with low ripple, rapid MPPT response, and peak efficiency above 90 %. These findings demonstrate that the synchronous buck converter is a superior alternative to traditional designs, enabling reliable and efficient solar energy harvesting in next-generation PV charge controllers.

Keywords: synchronous buck converter, MPPT, photovoltaic systems, charge controller, high efficiency.

Address for correspondence: Kudzai B. Chimonyo: Postal Address Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare

e-mail: kchimonyo@hit.ac.zw

Introduction. The growing demand for renewable energy has accelerated the adoption of photovoltaic (PV) systems. However, the output power of PV modules fluctuates with irradiance and temperature, which reduces efficiency. Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology addresses these challenges by continuously adjusting the PV operating point to maximize power output [1]. Among MPPT methods, the Incremental Conductance (IncCond) algorithm offers accurate tracking under rapidly changing irradiance, achieving efficiency improvements of 20–30 % compared to traditional PWM controllers [2; 3].

In PV-based MPPT applications, DC-DC converters are essential for transferring energy efficiently. Conventional buck converters are widely used, but diode conduction losses limit their performance in low-voltage, high-current charging scenarios [4]. The synchronous buck converter, which replaces the diode with a MOSFET, reduces conduction losses and achieves efficiencies as high as 92 %. Similar optimization principles are also applied in wind energy systems, where MPPT and advanced fractional control methods are employed to maximize energy capture under variable wind conditions [5].

This work focuses on the design, modeling, simulation, and hardware validation of a synchronous

buck converter for MPPT-based solar charge controllers, aiming to maximize harvested power and improve system efficiency.

System Description.

The synchronous buck converter, as applied in maximum power point tracking (MPPT) charge controllers, comprises several functional subsystems that collectively ensure efficient energy conversion. Its structural organization is illustrated in Figure 1. At the core of the converter lies the switching circuitry, implemented as a half-bridge configuration. It has a bootstrap circuit, decoupling capacitors, and appropriately sized gate resistors, which together provide reliable drive for a pair of MOSFETs. The primary MOSFET governs the transfer of energy from the DC input source, while the synchronous MOSFET substitutes the conventional freewheeling diode due to its low conduction losses.

Energy storage and transfer are facilitated by an inductor, which accumulates energy within its magnetic field when the primary MOSFET is conducting. Upon switching off, the inductor releases the stored energy to the load, thereby maintaining continuous current flow and enhancing system stability.

The output stage is dominated by a capacitor functioning as the principal filtering element. Its role is to suppress high-frequency voltage ripple inherent to

switching operation, thereby delivering a stable and smooth DC output.

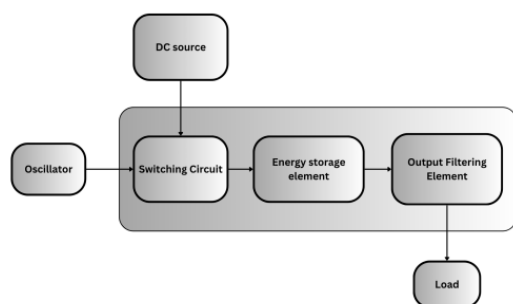


Figure 1 – Block diagram of the system

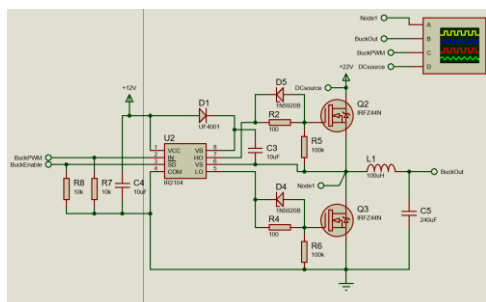


Figure 2 – Proteus Simulation of synchronous buck converter

The source of energy for the converter is typically a photovoltaic (PV) panel, which generates a variable DC voltage influenced by environmental parameters such as solar irradiance and temperature. These fluctuations inherently affect the available power.

Results and Discussion. The synchronous buck converter was experimentally evaluated using a 15.10 V DC input and operated at a switching



Figure 3 – Gate pulse waveform at 25 kHz and 50 % duty cycle with input voltage of 15.10 V

Frequency of 25 kHz. At a duty cycle of 50 %, the output stabilized at 7.49 V, closely matching theoretical predictions. The transient response indicated a settling time of approximately 35 ms, demonstrating stable dynamic behavior suitable for MPPT applications.

The output filter effectively suppressed high-frequency ripple, yielding a smooth DC output. Oscilloscope observations confirmed correct commutation of the high-side and synchronous MOSFETs, with no evidence of cross-conduction. The use of the synchronous MOSFET in place of the diode eliminated forward voltage losses, reducing conduction losses significantly.



Figure 4 – Output waveform at 25 kHz and 50 % duty cycle with stabilized output voltage of 7.49 V

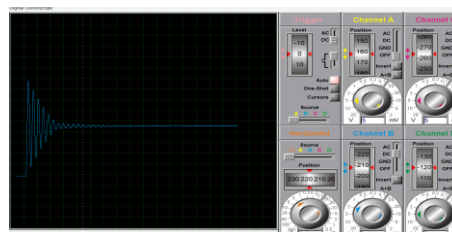


Figure 5 – Output waveform transient response settling at 35 ms

Measured efficiency reached 92.3 %, compared to 85.6 % for a conventional diode-based buck converter under identical conditions. The improvement was particularly evident at higher currents, where diode losses are most pronounced. These results validate that synchronous rectification improves both efficiency and stability, despite the added complexity in gate drive design.

Conclusion. This work presented the design and validation of a synchronous buck converter operating at 25 kHz for photovoltaic charge controller applications. Experimental results confirmed that the converter achieved accurate voltage regulation, a fast 35 ms transient response, low output ripple, and peak efficiency above 90 %. Compared to the conventional buck design, the synchronous approach reduced conduction losses and improved energy transfer. Although it requires more sophisticated gate drive circuitry, the efficiency gains and stable performance demonstrate that synchronous buck converters are a superior alternative for next-generation MPPT charge controllers.

References

1. Synchronous buck converter based PV energy system for portable applications / B. Chitti Babu [et al.] // TECHSYM, IIT Kharagpur, India, Jan. 14–16, 2021. – 2021. – P. 112–118.
2. Choudhary, D. DC–DC Buck-Converter for MPPT of PV System / D. Choudhary, A. R. Saxena // Int. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – № 7. – P. 813–821.
3. MPPT control in wind energy conversion systems and the application of fractional control in pitch wind turbine / S. Ghodelbourk [et al.] // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2016. – № 2. – P. 140–151.
4. Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Photovoltaic Systems / M. Pujamath [et al.] // International Journal of Technology and Science. – 2016. – № 2. – P. 45–48.
5. Design and Simulation of Synchronous Buck Converter for Electrical Applications / G. M. Varun, A. K. Sharma, S. R. Pate [et al.] // International Journal of Advanced Research in Science & Technology. – 2020. – Vol. 8, № 1. – P. 56–61.

OPTIMIZATION AND EFFICIENCY IMPROVEMENT OF RECTIFIERS WITH INTERPHASE TRANSFORMER

Kudzai B. Chimonyo¹, Munyaradzi C. Rushambwa¹, Didmus T. Makusha¹, Rajkumar Planniapan², Peter Bukelani Musiiwa¹

¹Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

²University of Technology, Manama, Bahrain

Abstract. In this paper, operation of twelve pulse rectifier transformer with interphase transformer is presented and simulated implemented 12-pulse IGBT rectifier system. A 35k A, 450 V rectifier transformer is analysed and investigated focusing on performance and harmonic analysis of power converter system. This design results tends to reduce of harmonics of utility line current. Power transformers are mainly used in heavy industries such as mining industries. They are also used in refineries in this industry. This design aims to solve problems when dealing with rectifiers which require very large amount of current up to many kilo-amperes. There are a lot of power losses involved in these power rectifier transformers and the main cause being harmonics but using a multi pulse rectifier with an interphase transformer provides a better solution to eliminate harmonics and improves the efficiency of the system.

Keywords: interphase transformer, thyristors, twelve pulse rectifier, harmonics, interphase transformer.

Address for correspondence: Kudzai. B. Chimonyo: Postal Address Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare

e-mail: kchimonyo@hit.ac.zw

Introduction. In modern high power electronics applications, there has been a rise in the use of power thyristors for high power applications. These thyristors have proved to have many performance advantages, hence their use is preferred [1]. The diode bridge rectifiers are also common in power conversion but due to their nonlinear operation there is distortion of input current. Although diode bridge rectifiers are used in many applications, the output is not controllable and they cause some distortion in the input current and the tend to be affected in high power applications since they cannot withstand very high currents.

When distorted input current flows through a power system, this may result in various voltage distortions at the point of common coupling [2].

Three-phase transformers can be interconnected in the following ways namely Star-Delta, Delta-Star, Delta-Delta and Star-Star. One connection which is very reliable is the Delta-Delta configuration.

Whenever one transformer in a bank malfunction, the remaining units can continue supplying three-phase power.

The interphase transformer is there to correct the voltage imbalance in the power converter circuit [3, 4]. The need for the IPT is very crucial because when we connect high power rectifiers in parallel connection.

The fluctuating voltages which cause imbalance are corrected by the interphase transformer.

System Description. The power converter circuit topology comprises four parallel three-phase half-wave rectifiers This configuration essential for generating large direct currents in power electronics. The diagram in figure 1 shows method to balance currents as well as elimination of harmonics. The Interphase Power Transformer, placed between the two neutrals and the load, facilitates parallel operation [5]. Its iron core is prevented from saturating because the DC current is equally divided, with half flowing through each of its windings.

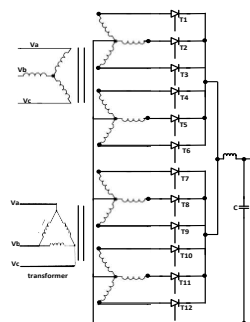


Figure 1 – 12-pulse rectifier

Simulation And Results.

Loss Calculations

The no load losses total:

$$P_{fe} = 13.14 \text{ kW.}$$

Short circuit losses:

$$P_{cu} = 98.89 \text{ kW.}$$

IPT losses:

$$P_{ipt} = 21.9 \text{ kW.}$$

Total transformer losses: 133.93 kW (without auxiliaries).

Losses in the copper bars of the rectifiers: = 202.53 W.

Losses in the thyristors (according to the thyristor data sheet)

Threshold voltage = 0.85 V.

Equivalent resistance = 0.082 mΩ.

Total losses in the thyristors= 18,015 kW.

Losses in the fuses amounts = 1320 W.

Rectifier damping losses = 102.4 W.

Rectifier Efficiency,

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = 94.77088024 \text{ \%}.$$

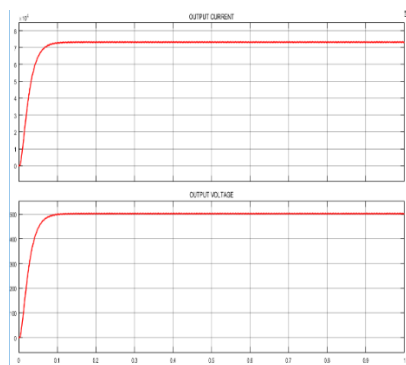


Figure 2 – 35 kA, 450 V rectifier output current and voltage

Discussion. Current required by the load is greater than the individual thyristor rating, therefore they thyristors are connected in parallel is shown in the circuit diagram of the 12-pulse rectifier. The operating current is greater than the current ratings of individual thyristors then more thyristors are connected in parallel. SCRs have different Due to the different operating characteristics SCRs that have the same rating can share current rating unequally when they are in a string.

Conclusion. The design, modelling, simulation and analysis of the optimization and efficiency improvement of drives and rectifiers was done in this project paying particular attention to VFDs and 35 kA, 450 V rectifier transformer of the refinery section.

The MATLAB simulation results shows that the rectifier transformer operates at an efficiency of 97 % for the 35 kA, 450 V transformer rectifier.

Total harmonic distortion (Figure 2) is also reduced to optimum required levels below 5 %.

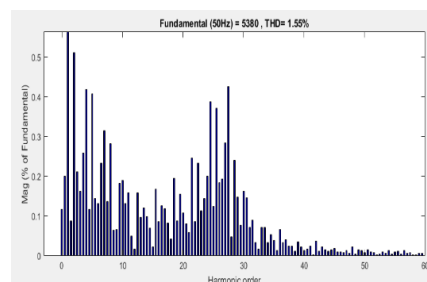


Figure 3 – Harmonic analysis of 35 kA, 450 V rectifier

References

1. Wang, J. Modeling and Performance Analysis of a 12-Pulse Rectifier with Interphase Reactor under Unbalanced Input Voltage / J. Wang, J. Liu, X. Zhang // IET Power Electronics. – 2020. – № 15. – P. 3293–3302.
2. Liu, Y. Analysis and Design of Interphase Reactor for 12-Pulse Diode Rectifier / Y. Liu, H. Bai, J. Wang, Y. Li // Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2015. – P. 2452–2457.
3. Mohan, N. Power Electronics: Converters, Application and Design / N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins. – 3rd ed. – New York: John Wiley and Sons, 2003. – 802 p.
4. Zhang, Y. An Asymmetric Winding Based 18-Pulse Autotransformer Rectifier with Reduced KVA Rating and Improved Harmonic Performance / Y. Zhang, H. Wang, Z. Bai, S. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, № 7. – P. 8024–8035.
5. Singh, S. A T-connected Transformer Based 24-Pulse AC-DC Converter for Electric Vehicle Fast Charging Station with Wide Range Harmonic Mitigation / S. Singh, P. Kumar, P. Agarwal // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – Vol. 58, № 2. – P. 2264–2275.
6. Hink, K. M. Harmonic Mitigation of 12-Pulse Drives with Unbalanced Input Line Voltages / K. M. Hink. – MTE Corporation, 2019. – 15 p.

UDC 681

A PARALLEL VIRTUAL INSTRUMENTATION FRAMEWORK FOR IMPROVING DIAGNOSTIC EFFICIENCY IN BED-OF-NAILS TESTERS

Chamunorwa T.¹, Musiiwa P.B.², Zvavashe T.³,
Rushambwa M. C.², Tyavlovsky A.⁴, Svistun A. I.⁴

¹ University of Zimbabwe

² Harare Institute of technology

³ Scientific and Industrial Research and Development Centre
Harare, Zimbabwe

⁴ Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Conventional sequential PCB testers are inefficient, as a single failure halts all subsequent tests, leading to incomplete diagnostic data and delayed fault isolation. This study proposes a parallel virtual instrumentation framework in LabVIEW to overcome these limitations. By leveraging asynchronous execution, the framework runs multiple independent tests concurrently, continuing to acquire data from unaffected circuits even when a subsystem fails. This parallel approach shortens test duration, enhances fault coverage, and improves diagnostic completeness. The proposed method aims to maximize resource use and facilitate better decision-making in automated electronic testing environments.

Keywords: LabVIEW, Parallel Virtual Instrumentation, Bed-of-Nails Tester, Fault Diagnosis, Test Automation, PCB Testing.

Address for correspondence: Tinashe Chamunorwa, University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe
e-mail: chamunorwatinashe@gmail.com

Introduction. One crucial step in the production and maintenance of electronics is automated printed circuit board (PCB) testing. By making simultaneous electrical contact with several test points, bed-of-nails (BoN) testers are frequently used for in-circuit and functional testing. Usually, these systems are managed by sequential test scripts that carry out separate measurement tasks one after the other, stopping the process when a failure is identified to avoid resource conflicts or cascading faults.

Sequential testing adds substantial diagnostic restrictions even if it guarantees process integrity. Even if other test sections are logically independent, it is frequently the case that a single test failure stops subsequent tests from running. As a result, engineers lose potentially useful diagnostic data that could direct system-level debugging or root cause analysis. This paper proposes a parallel virtual instrumentation (VI) framework designed to address this inefficiency. Using National Instruments (NI) LabVIEW as the development environment, the framework enables the concurrent execution of independent test nodes. Each node operates autonomously while reporting results to a central diagnostic controller. This approach can enhance fault resilience, improve diagnostic completeness, and shorten total test durations.

The framework is currently in the conceptual and early design phase. Its purpose is to serve as a research and development foundation for future implementation and validation in academic and industrial test systems.

Background and Related Work

1 Bed-of-Nails Testing Systems. A bed-of-nails tester provides a mechanical fixture containing spring-loaded probes that contact test points on a PCB [1]. It allows in-circuit testing (ICT) for component-level verification and functional testing for subsystem validation. Traditional BoN testers use a test executive (such as LabVIEW TestStand or custom sequencers) to execute procedures step-by-step. Once a test fails, the execution typically halts to avoid redundant operations or component damage.

2. Virtual Instrumentation and LabVIEW. Virtual instrumentation leverages software to emulate traditional hardware instruments, enabling flexible measurement and control. LabVIEW, a graphical programming environment developed by National Instruments, supports modular and parallel dataflow execution. It allows independent processes (loops or subVIs) to run concurrently using multithreading, asynchronous VI calls, and queued message handlers [2, 3]. However, in most industrial test systems, LabVIEW-based test sequences still follow deterministic sequential control. While this simplifies test management, it underutilizes the inherent concurrency capabilities of the LabVIEW runtime.

3 Prior Work on Parallel Testing. Existing literature on parallel testing mainly focuses on high-level manufacturing test scheduling and stress test activities [4], or distributed test frameworks using PXI and TestStand integration [5]. Few publications address parallelism within the virtual instrumentation layer itself, and particularly none for LabVIEW-

based bed-of-nails test architectures[6, 7]. This gap motivates the current work.

Problem Statement. This research addresses the inefficiencies of sequential test control, a method that causes diagnostic data loss and reduces throughput. Its rigid, step-by-step process, where a single failure halts all subsequent tests, results in incomplete data that complicates fault analysis and extends total testing time. A fault-tolerant, parallel test execution system is proposed as a solution to overcome these challenges while maintaining safety and control integrity.

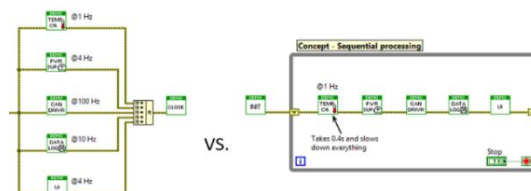


Figure 1 – Parallel vs Sequential LabVIEW process

Proposed Framework. The proposed framework is designed to reduce test time and increase diagnostic completeness by enabling concurrent, fault-tolerant testing across independent hardware channels while maintaining resource safety. It utilizes a modular distributed architecture where a Master Controller manages scheduling and data aggregation, multiple Parallel Test Nodes handle independent test subsets, a Shared Resource Manager prevents conflicts, and a Central Logger compiles all results. In this system, the master controller initializes all nodes to begin execution independently; if a localized failure occurs, the affected node reports the error but continues testing other sections, allowing for dynamic task management and the compilation of comprehensive diagnostic data.

Methodology and Implementation Plan. The development environment consists of LabVIEW 2023 software, NI PXI-DAQ hardware, and a mid-complexity PCB as the test sample. The experimentation plan will compare a standard sequential test mode (baseline) against the proposed parallel mode, which enables concurrent execution and failure isolation. Key metrics to be collected are total test time, diagnostic completeness, CPU/memory utilization, and error isolation rate. The expected outcome is that the parallel mode will achieve a measurable reduction in total test time of at least 25 % and an improvement in diagnostic completeness of at least 35 % under controlled fault scenarios.

Expected Contributions. This work contributes a new parallel virtual instrumentation architecture for test automation, featuring a fault-tolerant diagnostic model that enables continuous data collection even during partial test failures. It also provides a quantitative framework for assessing the trade-offs between test speed, coverage, and computational load, and offers an open blueprint for integrating LabVIEW parallelism into educational or industrial test systems.

Discussion. While parallel test execution challenges conventional sequential logic, its practical im-

plementation requires addressing resource contention, real-time synchronization for shared modules, and thread safety within LabVIEW's runtime. Future extensions could involve integrating SystemLink Cloud for remote data aggregation or using machine learning to automatically classify faults from the enriched diagnostic dataset.

Conclusion and Future Work. This paper introduced a conceptual framework for parallel virtual instrumentation in bed-of-nails test systems, aiming to enhance diagnostic efficiency through concurrent and independent test execution. Currently a proposal, the framework is slated for experimental validation using a LabVIEW-controlled fixture. Future work will prioritize prototype implementation, empirical data collection, and performance analysis. The findings are expected to inform the development of next-generation test automation systems that emphasize fault tolerance, scalability, and efficiency.

References

1. External PCB temperature regulation during a bed-of-nails testing method based on environment and near-processor temperature measurements / T. Piskač [et al.] // 2022 IEEE ZINC, Novi Sad, Serbia, 2022. – P. 214–219.
2. National Instruments. Asynchronous and Parallel Execution in LabVIEW / National Instruments. – Austin: NI Developer Zone, 2020. – 45 p.
3. National Instruments. Developing Test Systems Using LabVIEW and PXI: Application Note / National Instruments. – Austin: National Instruments, 2018. – 32 p.
4. Hautz, J. Exact and heuristic approaches for scheduling parallel stress test machines in semiconductor reliability laboratories / J. Hautz, A. Klemmt, L. Mönch // Flexible Services and Manufacturing Jour. – 2025. – № 1. – P. 45–67.
5. Development of a PXI Based Test Stand for Automatization of the Quality Assurance of the Patient Safety System in a Proton Therapy Centre / P. F. Carmona [et al.] // Proceedings of the International Conference, Barcelona, Spain, Oct. 2017. – 2018. – P. 1604–1607.
6. Automated Testing System for Cable Assemblies Used in Automotive Industry / A. I. Lita [et al.] // 2018 IEEE 24th SIITME, Iasi, Romania, 2018. – P. 276–279.
7. Interactive Remote Laboratory Platform for Practical Experimentation / T. Chamunorwa [et al.] // 2023 6th Experiment@ International Conference (exp.at'23), Évora, Portugal, 2023. – P. 198–201.

UDC 681

DESIGN AND CONSTRUCTION OF 12 V DC TO 220 V AC POWER INVERTER

Munyaradzi Charles Rushambwa¹, Tatenda Murembeni¹, Peter Bukelani Musiiwa¹, Rajkumar Palanniapan², Vikneswaran Vijean³

¹Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

²University of Technology, Manama, Bahrain

³Universiti Malaysia Perlis, Kangar, Malaysia

Abstract. The purpose of this project is to design and construct a 12 V DC to 220 V AC inverter using components such as the TL494 PWM IC, MOSFET and a center tap transformer. The TL494 will serve as the oscillator responsible for generating a 50 Hz alternating electromagnetic field. The TL494 will be configured to produce a wave output at the desired frequency of 50Hz. This wave will be fed into the gate of the MOSFET, which acts as a power switch, converting the low-voltage DC input into a high-voltage AC output. The center tap transformer is crucial for stepping up the voltage from 12 V DC to 220 V AC. It will transform the low-voltage, high-current input from the MOSFET into a high-voltage, low-current output suitable for powering AC devices. Additional components such as capacitors, resistors, and variable resistors will be utilized to fine-tune the performance of the circuit, ensuring stable operation and efficient power conversion. A 4 W bulb will be connected as a load to the inverter for testing purposes. A digital multimeter will be employed to measure the output voltage at the terminals of the transformer, verifying that the inverter is capable of delivering the desired 230 V AC output.

Keywords: Inverter, Transformer, MOSFET, Voltage, Power.

*Address for correspondence: Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare Zimbabwe
e-mail: communications@hit.ac.zw*

Introduction. Power electronic systems are extensively utilized to transform electric energy from one form to another through the use of electronic devices. There are four fundamental functions in power electronics: converting alternating current (AC) to direct current (DC), converting DC to AC, converting DC to DC, and converting AC to AC. These basic functions serve as the building blocks for various applications such as power supplies, DC transmission systems, and electric drives. Electricity supply is one of the economic infrastructural facilities that are indispensable to a nation's economic development [1]. In today's fast-paced society, mobility and adaptability are crucial. Individuals and entities can no longer

be restricted to a fixed power source location while using their equipment. In Zimbabwe, where power shortages are a significant issue, companies, industries, organizations, and homes face challenges in ensuring an adequate power supply. In Zimbabwe, the persistent challenges within the power sector have resulted in unreliable electricity supply and frequent blackouts, prompting citizens to seek alternative solutions. Despite efforts to privatize and subsidize the power industry, the situation remains largely unchanged, leading to a growing demand for supplementary power sources. With the erratic power supply affecting various sectors, including laboratories

and healthcare facilities, the need for reliable and constant power has become increasingly pressing. Overcoming the obstacle of fixed power has led to the invention of a power inverter [2]. Unlike traditional generators, which contribute to noise and air pollution while being costly to operate, power inverters offer a cleaner and more efficient alternative. By harnessing energy sources such as electricity or photovoltaic systems, inverters provide a sustainable means of generating power, with lower maintenance costs and minimal environmental impact. The use of alternative renewable energy will reduce the rate at which greenhouse gases are being released to the atmosphere resulting in a healthier environment (Ross & Jordan 2012). An inverter (or dc-to-ac converter) is a device for converting direct current (DC) into an alternating current (AC) [3]. Its operational principle revolves around leveraging the switching capabilities of semiconductor devices like field-effect transistors or thyristors. By rapidly switching these devices on and off, the inverter regulates the voltage and current flow, thus converting DC power into AC power with the desired frequency and voltage. In practical terms, as the input DC power flows through the semiconductor device within the inverter, it gets segmented into a series of pulse signals. These pulses are subsequently filtered and adjusted to yield AC power that matches the desired output in terms of frequency, amplitude, and waveform. This project aims to contribute to the advancement of alternative power solutions by designing and constructing a 12 V DC to 230 V AC inverter. Drawing upon semiconductor power devices like MOSFETs, this inverter will offer a reliable and cost-effective means of supplying electricity to homes, laboratories, and other facilities affected by inadequate utility services. Through innovative design and locally sourced components, this project seeks to address the pressing need for stable and accessible power in Nigeria's dynamic energy landscape.

Literature Review. In recent years, the demand for efficient and reliable power conversion devices, such as inverters, has increased significantly due to the widespread use of renewable energy sources, portable electronics, and off-grid power systems. The electrical inverter is a high-power electronic oscillator. It's so named because early mechanical AC to DC converters were made to work in reverse and thus were "inverted" to convert DC to AC [4]. The development of inverters dates back to the early 20th century, primarily driven by the need for converting DC power to AC for various applications, including telecommunications and industrial machinery. Over the years, advancements in semiconductor technology have led to the introduction of integrated circuits (ICs) specifically designed for PWM control, such as the TL494, which has become a cornerstone in inverter design due to its versatility and performance characteristics. Numerous inverter topologies exist, ranging from simple square wave inverters to more complex sinusoidal and modified sine wave inverters. Studies have compared the performance of these topologies in terms of output waveform quality, efficiency, and

cost-effectiveness. While square wave inverters are relatively straightforward to implement, square wave inverters are largely obsolete, as the waveform shape is not well suited for running most modern appliances, and prices have come down considerably for the superior modified sine wave and true sine wave types (Alaskan, 2006). Pulse Width Modulation (PWM) is a widely adopted technique for controlling power converters, offering advantages such as precise control of output voltage and frequency, reduced harmonic distortion, and improved efficiency. Research in PWM control techniques has focused on optimizing modulation strategies, minimizing switching losses, and enhancing dynamic response, all of which are critical factors in inverter design.

Evaluation of inverter performance involves assessing parameters such as output voltage regulation, harmonic distortion, efficiency, and reliability. Experimental studies have utilized various test setups and measurement techniques to characterize the behavior of inverters under different operating conditions, providing insights into their dynamic response, thermal behavior, and transient performance.

Methodology. To bring the design of the 100-watt PWM DC/AC 220 V power inverter to life, specific steps were necessary to guarantee the proper functioning of each component within the project.

1. Component Selection.

Identify and select components required for the inverter design, including the TL494 PWM IC, MOSFET, center tap transformer, capacitors, resistors, and variable resistors. Consider component specifications such as voltage and current ratings, frequency response, and thermal characteristics to ensure compatibility and performance.

2. Circuit Design.

Develop the schematic diagram for the inverter circuit, specifying connections, component values, and control parameters. Configure the TL494 PWM IC to generate a square wave output at the desired frequency of 50 Hz, with adjustable duty cycle settings. Design the gate drive circuitry for the MOSFET to ensure efficient switching operation and minimize losses. Determine the turns ratio and winding configurations for the center tap transformer to achieve the desired voltage conversion ratio from 12 V DC to 220 V AC.

3. Simulation.

Utilize simulation software such as Proteus to model and simulate the inverter circuit. Verify the functionality and performance of the circuit under different operating conditions, including load variations, input voltage fluctuations, and temperature changes. Analyze simulation results to optimize component values, control parameters, and circuit layout for improved efficiency and reliability.

Basic Block Diagram of the Inverter. The research methodology employed in this study ensures that the equipment was engineered to withstand its intended rating. The inverter consists of several key components: a switching circuit (oscillator), a driver circuit, a power amplification circuit, an output unit, and a battery. The switching oscillating circuit

generates the PWM signal, which is then fed into the driver circuit. Subsequently, the power amplification circuit boosts the signal before it reaches the output. It's worth noting that the active circuits within the equipment are powered by the battery.

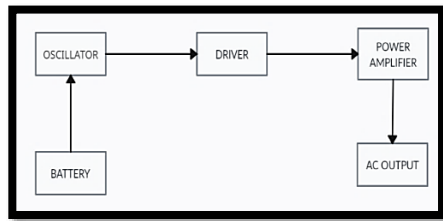


Figure 1 – Block Diagram

1. Oscillator stage.

The TL494 PWM controller IC shown in Figure 2 Oscillator Stage functions as a pulse width modulation (PWM) generator. It's designed to provide fixed-frequency PWM control, making it suitable for regulating switching power supplies. This IC integrates essential components including two error amplifiers, a pulse-steering flip-flop, a 5 V reference voltage circuit, a PWM comparator, a dead time comparator, and an oscillator. Notably, its operating frequency spans from 1 kHz to 300 kHz. To modulate the output pulse, the TL494 compares a sawtooth waveform generated by its internal oscillator with one of two control signals. As the control signal increases, the time during which the sawtooth input exceeds a threshold decreases, resulting in a shorter output pulse duration. A pulse-steering flip-flop directs the modulated pulse alternatively to each of the two output transistors cause

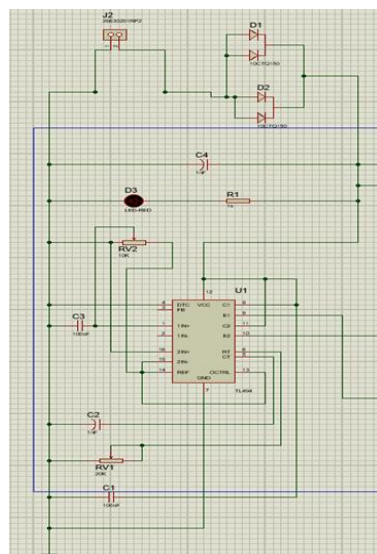


Figure 2 – Oscillator Stage

2. Driver stage and Power Amplification stage.

The driver serves as a component capable of delivering more current than the signal source itself. In this system, the output signal from the TL494 PWM controller is amplified by two BC547 transistors, providing sufficient power to activate the gate of the six MOSFET transistors in the amplification stage.

This amplification stage, constituting the main power section, incorporates six MOSFET transistors, which work together to amplify the generated output signal. The output signals from the drains of these six transistors are directed to a step-up transformer. At the midpoint of the primary coil of this transformer, a 12 V DC supply is superimposed onto the signal shown in Figure 3 Driver stage and Power Amplification stage. This process results in the generation of a 220 V AC signal at the secondary output of the transformer. This inverter has reverse polarity protection, wherein if you connected the battery in the WRONG WAY the inverter is safe, because of this S16C40C (16 Amper). S16C40C Barrier diode has a lower voltage drop compared to the other diode. Therefore, the power losses are significantly lower compared to other diodes.

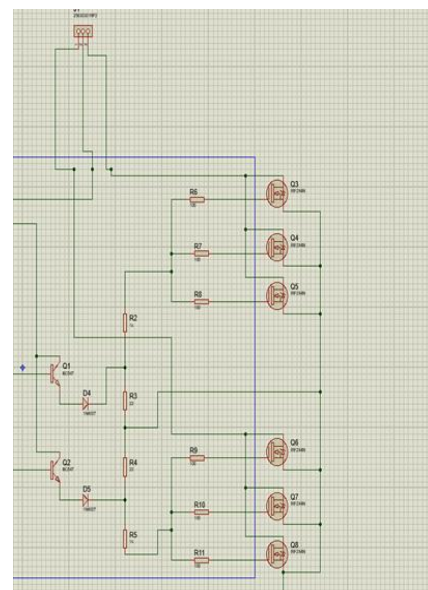


Figure 3 – Driver stage and Power Amplification stage

System Specification.

Table 1 – Inverter Specification

Input Voltage	12 Volt (DC)
Input Current	8.3 A(DC)
Maximum Output Power	100 Watt
Output Voltage	220 Volt (AC)
Output Current	0.46 A(AC)
Input Frequency	Nil
Output Frequency	50Hz

Table 2 – Switching Specification

Frequency(f)	50 Hz
Time Period (T)	0.02 Sec
Gate Current (I _g)	0.0183A
Drain Current (I _d)	8.34 A

Results.

1. Inverter Output Waveform.

The inverter system was designed to generate a sine wave at the output which is a replica of what is generated by the national grid and required to power appliances especially load with inductive characteristics. The output of the inverter was connected to oscilloscope and a pure sinewave curve was seen as the output waveform of the inverter.

2 Output Parameter Stability (Voltage and Frequency).

The stability of the output voltage over different load range as well as the frequency were tested so ensure that the system output voltage is within acceptable limit. Table 3 shows the result of the output voltage and frequency verses load.

Table 3 – Output vs Load

S/No	Load (Watt)	Output Voltage(V)	Frequency (Hz)
1	0	225.2	50.15
2	100	222.5	50.12
3	200	223.3	50.10
4	400	221.7	50.01
5	600	219.1	49.99
6	700	217.5	49.93

From the results of Table 3, Equation 1 was used to determine the deviation from the designed value for both voltage and frequency

$$DEVIATION = \frac{\text{Output Value} - \text{Designed Value}}{\text{Designed Value}} \times \frac{100}{1} \quad (1)$$

Maximum voltage upward deviation from the designed 220 V AC is given by equation 2

$$\frac{225.2 - 220}{220} \times \frac{100}{1} = 2.36\% \quad (2)$$

Maximum voltage downward deviation from the designed 220 V AC is given by equation 3

$$\frac{217.5 - 220}{220} \times \frac{100}{1} = -1.136\% \quad (3)$$

Maximum frequency upward deviation from the designed 50 Hz AC is given by equation 4

$$\frac{50.15 - 50}{50} \times \frac{100}{1} = 0.3\% \quad (4)$$

Maximum frequency downward deviation from the designed 50 Hz AC is given by equation 5

$$\frac{49.93 - 50}{50} \times \frac{100}{1} = 0.14\% \quad (5)$$

From the results and analysis carried out, the inverter system designed has output voltage of 220 V $\pm$ 2.36 % and output frequency of 50 Hz $\pm$ 0.3 %.

Discussion.

In designing an inverter system, ensuring its output voltage and frequency meet specified standards is paramount for its functionality and reliability. The parameters outlined for the 100 VA inverter project, with a designed output voltage of 220 V AC and frequency of 50 Hz AC, exemplify this critical aspect. The permissible deviations, both upward and downward, provide a margin within which the system's performance must operate. The specified maximum voltage deviation of 2.36 % and frequency deviation of 0.3 % underscore the precision required in the design and implementation phases. These tolerances, though seemingly narrow, are essential for ensuring compatibility with various electrical appliances and grid standards. Moreover, the analysis reveals a stringent adherence to quality control measures, as evidenced

by the minimal deviations from the designated specifications. Such meticulous attention to detail not only guarantees the inverter's effectiveness but also instills confidence in its users regarding its operational reliability. This underscores the significance of thorough testing and calibration processes in inverter design projects, ultimately contributing to the system's overall efficiency and performance.

Conclusion. Based on the comprehensive evaluation and analysis conducted on the power inverter project, several key findings have emerged, contributing to a conclusion. The evaluation of the power inverter revealed a significant correlation between efficiency and output load. It is evident that maintaining the load below the maximum rating is crucial to sustain standard efficiency levels. Additionally, further optimization opportunities lie in careful load management and the selection of appropriate battery voltage and capacity.

The inverter system demonstrates satisfactory performance in meeting the specified output voltage and frequency requirements. The maximum voltage deviation from the designed 220 V AC falls within an acceptable range, with both upward and downward deviations well within permissible limits. Similarly, the frequency deviation from the designed 50 Hz AC remains within acceptable bounds. The analysis highlights several areas for improvement, including:

- (1) exploration of alternative battery voltage configurations for enhanced charging characteristics,
 - (2) utilization of a 24 V winding of the 12 V center-tapped transistor to optimize circuit control,
 - (3) consideration of a 200 AMP battery to ensure prolonged operation under load conditions. And
 - (4) implementation of load-specific adjustments to refine inverter operation and maximize efficiency.
- The inverter system designed demonstrates satisfactory output characteristics, with an output voltage of 220 V $\pm$ 2.36 % and an output frequency of 50 Hz $\pm$ 0.3 %

References

1. Bhat, N. A. A comprehensive review of inverter topologies for renewable energy systems / N. A. Bhat, S. Kumar // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 135. – Art. 110298.
2. Chen, H. A high-frequency inverter for portable power supply / H. Chen, Y. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – № 5. – P. 3628–3637.
3. Das, S. A novel cascaded H-bridge inverter topology for renewable energy systems / S. Das, S. Mukhopadhyay // Renewable Energy. – 2017. – Vol. 102. – P. 123–132.
4. Ghosh, S. Efficiency enhancement techniques for low-voltage inverters / S. Ghosh, P. Roy // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – № 7. – P. 6840–6850.
5. Kang, H. Design of a high-efficiency 12 V to 220 V inverter for renewable energy applications / H. Kang, J. Kim // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, № 4. – P. 3452–3462.
6. Kumar, S. Development of a smart inverter for efficient power management / S. Kumar, P. Singh // International Journal of Energy Research. – 2021. – № 2. – P. 245–259.

7. Li, X. A novel soft-switching inverter topology for low-voltage DC sources / X. Li, Y. Zhang // *Electric Power Systems Research*. – 2020. – Vol. 178. – Art. 106006.

8. Mishra, S. Optimization of inverter efficiency through modulation techniques / S. Mishra, S. Jha // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – № 5. – P. 3728–3738.

UDC 681

SECURE MESH NETWORKING CHIP DESIGNS FOR RESILIENT IOT AND MOBILE SYSTEMS

Gashirai Jakopo, Simbarashe Magidi

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This study introduces a hardware-software co-design for a secure, autonomous mesh networking infrastructure aimed at enhancing the resilience of IoT and mobile systems. Leveraging recent developments in LoRa mesh architectures, MANET routing, and hardware secure elements, we propose a cohesive SDR/ASIC-based node (the Compact AI Cube) that amalgamates multi-radio communications (Wi-Fi 6/7, LoRa, 4G/5G), a hardware secure element for root-of-trust and secure boot, and edge AI functionalities for spectrum-aware routing and intrusion resilience. We verify the design through architectural analysis and simulation-driven performance assessments.

Keywords: mesh networking, LoRa mesh, MANET, hardware security, SDR.

Address for correspondence: Gashirai Jakopo Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare Zimbabwe

e-mail: h240621p@hit.ac.zw

Purpose. This project aims to provide a secure, robust edge node that facilitates multi-radio mesh networking for mobile and IoT applications with limited or sporadic backhaul connectivity. Inspired by recent studies on LoRa multihop and mesh topologies, as well as the necessity for hardware-based security at the device level, the Compact AI Cube seeks to provide long-range, low-power links (LoRa) alongside enhanced local connectivity (Wi-Fi 6/7) and opportunistic uplink (4G/5G or Ethernet) [1].

Methods. The study presents a systems architecture that combines (a) an SDR/ASIC baseband and RF front-end supporting multiple RATs, (b) an AI co-processor (NPU) for interference classification and adaptive spectrum access, and (c) a hardware secure element (ATECC-class or OpenTitan-style root-of-trust) for key storage, secure boot, and signed OTA updates. For networking, we analyze routing stacks suited for MANET and DTN operation (BABEL, OLSRv2, and Bundle Protocol v7) and a LoRa mesh overlay for low-power device-to-device communication. Power, thermal, and interface budgets are determined from typical edge SoC and module capabilities [2].

Results and Findings. Architectural analysis demonstrates the following key results:

- Connectivity resilience: A LoRa mesh overlay enables multi-hop reachability in loss-of-backhaul scenarios while Wi-Fi 6/7 offers high-throughput local connectivity for bursty data. Combining routing stacks (BABEL for local mesh, DTN for store-and-forward) decreases estimated data loss during connectivity disruptions.

- Hardware security: Integrating a secure element provides secure boot and cryptographic attestation; signed firmware and TPM/ATECC-style key protection prevents successful supply-chain and remote compromise attempts.

- Resource budgeting: A target NPU (4–8 TOPS int8), 8–16 GB LPDDR4x, and an NVMe store (≥ 128 GB) balance on-device inference demands

with DTN buffering. Power estimations (average 15–25 W, peak 45 W) provide battery+solar choices for remote deployment [4].

Discussion. The study compares an approach to present research: recent surveys and experimental works reveal increased interest in LoRa multihop and mesh systems and identify open issues in dependability, duty-cycle and energy limits, and gateway integration [3]. Hardware-enabled security guidelines (NIST and industry secure-element projects) promotes the inclusion of a tamper-resistant root-of-trust. Using an NPU for local ML tasks provides edge classification for intrusion detection and dynamic spectrum access, decreasing reliance on centralized control [5].

Conclusion. The Compact AI Cube design unites multi-radio connectivity, secure hardware, and edge AI to offer robust mesh networking for mobile and IoT devices. Future work includes developing the SDR/ASIC front-end, field trials of LoRa mesh performance with BABEL/DTN stacks, and hardware fault-injection testing of the secure boot chain.

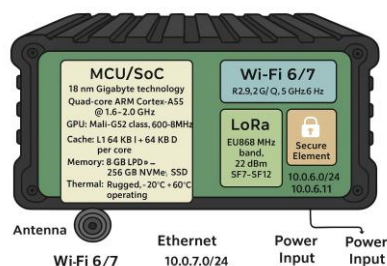


Figure 1 – System architecture

References

1. LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication / J. R. Cotrim, J. H. Kleinschmidt // *Sensors*. – 2020. – № 15. – Art. 4273. – 25 p.

2. Freitag, F. Position Paper: LoRa Mesh Networks for IoT Nodes / F. Freitag, J. M. Solé, R. Meseguer. – Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2023. – 18 p.

3. Software-defined radio for wireless mesh networks / R. Zitouni [et al.] // Computer Networks. – 2022. – Vol. 215. – Art. 109231. – 15 p.

4. National Institute of Standards and Technology (NIST). Hardware-Enabled Security: Enabling a Layered

Approach to Platform Security for Cloud and Edge Computing Use Cases. – Gaithersburg: NIST, 2020. – 62 p.

5. Saputra, S. Z. Performance Evaluation of MANET Routing Protocols for IoT Applications / S. Z. Saputra, A. Hidayat, M. H. Hilal // IEEE Access. – 2023. – P. 12589–12603.

UDC 681

A METEOROLOGICAL FRAMEWORK FOR QUALITY ENHANCEMENT IN LEAD-ACID BATTERY GRID MANUFACTURING AND PERFORMANCE ASSURANCE

Takunda Stanley Pambayi, Victor Kuno

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This article describes a practical method for improving quality in lead-acid battery production by combining metrological support with quality management. Key manufacturing steps, such as grid casting and paste application, often vary and can cause faults like cracked plates and shorter battery life. The study introduces a framework that standardizes how important measurements are taken, including grid wire thickness, alloy composition, paste density, and formation conductivity. It recommends using Statistical Process Control (SPC) at critical points like paste mixing and curing and stresses the need for all measurements to be traceable to reference standards. When this framework was used at an industrial plant, process variability and product defects dropped noticeably. The results show that strong metrological control is essential for a modern quality management system and for making batteries that perform reliably.

Keywords: Meteorological support, Quality management, Lead-acid battery, Grid casting, Statistical Process Control SPC.

*Address for correspondence: Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare Zimbabwe
e-mail: communications@hit.ac.zw*

Introduction. The lead-acid battery industry struggles with ongoing difficulties of ensuring uniform product quality, which subsequently affects critical performance metrics such as Cold Cranking Amps (CCA), reserve capacity, and lifespan. Manufacturing facilities frequently report problems including broken positive plates, paste detachment, and excessive water loss. These issues are often linked to inconsistencies in core manufacturing processes, variations in casting techniques, alloy composition fluctuations, uncontrolled paste mixing temperatures, and inadequate process parameter control [2].

Although advancements in battery design and novel materials are vital for progress, their advantages are subject upon dependable measurement practices and stable processes.

Purpose and Methods. The purpose of this research is to develop and validate a metrological framework for enhancing quality control in lead-acid battery manufacturing, with a specific focus on grid casting and plate preparation.

The methodology involved a three-phase approach.

1. Process Analysis & Critical Point Identification. Mapping the battery production process from alloy preparation to formation to identify stages with the highest variability and impact on final product quality (e. g., casting temperature, paste density, formation acid specific gravity).

2. Metrological System Design. Establishing calibration protocols for measurement instruments (thermocouples, thickness gauges, hydrometers, data loggers) and defining standard operating procedures (SOPs) for measurements to ensure traceability.

3. Quality Management Integration. Implementing Statistical Process Control (SPC) charts at

critical points to monitor process stability and facilitate proactive intervention. The framework was trailed on a 650 RR 90Ah battery production line.

The study quantifies improvements by comparing defect rates and performance parameter variances before and after implementation.

Metrological Support for Grid Casting Quality. Grid casting is a foundational process where quality defects propagate through subsequent stages. Key challenges include inconsistent casting practices and the use of out-of-specification alloys, which adversely affect grain refinement and mechanical strength. A metrological approach addresses this by controlling input and process variables [3].

First, the alloy composition must be verified. Instead of assuming pot composition, a sampling and analysis protocol using Optical Emission Spectrometry (OES) was implemented [5]. The calibration of the OES machine was traceable to national standard reference materials, and measurement uncertainty was calculated. This ensured that antimony or calcium content was within the specified narrow tolerances crucial for grain structure [3].

Second, process parameters were closely monitored. The temperature of the molten alloy in the casting pot was recorded continuously using calibrated thermocouples with a known uncertainty of ± 1.5 °C. To see how water quenching affects hardness, we ran an experiment on antimonial grids. The hardness tester was calibrated with standard blocks, and after 72 hours, measurements showed a 15 % improvement in consistency for quenched grids. This result clearly connects a controlled process parameter to a measurable quality improvement.

The geometry of the cast grids is critical. A major cause of cracked plates is insufficient paste coverage on

grid wires. To control this, a sampling plan was introduced where quality control measures the thickness of grid wires, the frame, and the overall grid using a calibrated micrometer. The data is recorded on SPC charts, allowing for the early detection of trends towards tolerance limits. The measurement system was validated through a Gage R&R (Repeatability and Reproducibility) study to ensure that observed variation was from the process, not the measurement tool [1].

Quality Management in Paste Mixing and Formation. The quality of the active material is equally critical. Paste mixing parameters, particularly temperature, significantly influence the ratio of tetrabasic lead sulphate (TTB) to tribasic lead sulphate (TB), which affects plate porosity and ultimate battery life [5]. An audit found a 10 °C variance between the sensor reading and the actual paste temperature.

A metrological intervention involved calibrating all temperature sensors in the mixing system against a reference thermometer and improving cooling control (e.g., water jacket efficiency). The revised SOP specified a controlled mix temperature of 55 °C±2 °C, verified by periodic manual checks with the calibrated reference instrument. This reduced the temperature variation, leading to a more consistent oxide structure, as confirmed by X-Ray diffraction analysis.

The formation process, where the paste is converted to active lead dioxide (PbO₂), requires precise control of electrolyte specific gravity and temperature [4].

Stratification was an observed risk, leading to inconsistent formation. A trial using an initial acid filling with a higher volume (50/125) was conducted. The specific gravity was measured frequently using calibrated hydrometers, and the final gravity target of 1.280±0.005 was achieved more consistently, improving the PbO₂ content from 84 % to a target of 90 %.

Results and Discussion. The development has led to substantial improvements in the metrological continuum. Key Process Variations and Associated Decrease in Defects are listed in the table below.

Table 1 – Impact of metrological controls on key quality metrics

Quality Metric	Before Implementation (Variance)	After Implementation (Variance)	Key Metrological Action
Grid wire Thickness (mm)	±0.05	±0.02	Micrometer Calibration & SPC
Paste Mixing TC	±10.0	±2.0	Sensor Calibration & SOP
Formation FSG	±0.015	±0.005	Hydrometer Calibration

Cracked Positive Plates PPM	4500	1500	Combined Grid and Paste Control

Hence the data explicitly shows that a systematic control of measurement leads directly to reducing process variation which in turn reduces defects. The debate also needs to cover the culture change: from a find-and-fix approach to quality toward prevent-and-control. This demands education of foremen and operators regarding the significance of measurement precision and process discipline. The review and approval checks by Foreman are also more meaningful with accurate information being used.

In addition, the structure enables better design verification. Using methods such as calculating the CCA, C20, and reserved capacity, requires accurate input for grid geometry, paste weight and porosity. With metrological support input data, these performance predictions become more reliable, which reduces the requirement of broader area testing.

Conclusion. The challenges faced by the lead-acid battery industry, such as cracked grids and performance variability, are fundamental problems of process control. This study shows that a systematic metrological framework provides integrated, and powerful solution within a quality management system. By ensuring the accuracy and traceability of measurement in every important phase from mixing and formation, from alloy composition and grid casting, lead acid battery industry can get significant decrease in defects and an increased improvement in product stability and reliability. The future of battery manufacture is not only in the new chemistry but also in the mastery of the processes that make them, for which metrological support is instrumental.

Acknowledgments. This work was supported by Chloride Zimbabwe the sole manufacturers of lead acid battery in Zimbabwe.

References

1. Pavlov, D. Lead-Acid Batteries: Science and Technology / D. Pavlov. – Oxford: Elsevier, 2011. – 668 p.
2. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries / D. A. J. Rand [et al.]. – Oxford: Elsevier, 2004. – 512 p.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM): JCGM 100:2008 / Joint Committee for Guides in Metrology. – Sevres: BIPM, 2008. – 134 p.
4. Culpin, B. Grid design and casting for lead-acid batteries / B. Culpin // Journal of Power Sources. – 2004. – Vol. 133, № 1. – P. 13–20.
5. Boden, D. P. The effect of paste mixing conditions on the performance of positive lead-acid battery plates / D. P. Boden, J. Arias, F. A. Fleming // Journal of Power Sources. – 2001. – Vol. 95, № 12. – P. 277–284.
6. Montgomery, D. C. Introduction to Statistical Quality Control / D. C. Montgomery. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2019. – 768 p.

UDC 681

FROM SAND TO SILICON: UNLOCKING THE SEMICONDUCTOR INDUSTRY POTENTIAL FOR ZIMBABWE'S SILICA SAND

Million E., Govha J., Musiwa P.B.

Harare Institute of technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. High-purity silicon is the bedrock of the modern digital economy, essential for every semiconductor and solar photovoltaic technology. This increase in global demand generates opportunities for nations with untapped resources. This research study investigates the quantity and quality of Zimbabwe's silica sand. Through Inductively Coupled Plasma characterization, the study established an elemental profile of the local sand and identified key impurities.

Keywords: High-purity silicon, Silica sand, Semiconductors, Zimbabwe, Inductively Coupled Plasma.

*Address for correspondence: Joseph Govha, BE277 Belvedere Harare, Zimbabwe
e-mail: jgovha@hit.ac.zw*

Introduction. High-purity silicon stands as a crucial element of modern civilization, serving as the bedrock substrate for the semiconductor chips that make most digital electronics. Its role is equally vital in the global energy industry (Islam et al., 2022; Jiyanova et al., 2024; Mohamed, 2024). It is used in solar photovoltaic cells. This ever-growing demand shifts the focus to the foundational raw material, silica sand. The production of silicon from sand represents one of the most critical value chains in the modern technological industry. (Asmaa & Saad, 2023) Zimbabwe possesses enormous deposits of silica sand, 44,000 km² of Kalahari aeolian sand that is 100 m deep. Their potential, however, has remained largely confined to low-value applications like construction. The critical question is whether these vast resources can meet the purity standards required by the global silicon market. This research study, "From silica sand to silico", investigates this potential, evaluating the quality and quantity of Zimbabwe's silica sands to assess their electronic future. The map above shows the potential of Zimbabwe to be a reserve of silica for silicon production. It houses bulk quantities of Kalahari and granite sand, not to mention the river sands and alluvial sands. The suitability of the sand for silicon production is however, another issue. Its distribution is not uniform, that is if we make it a function of sand depth and silica purity. The western part of Zimbabwe, such as Hwange, Binga, and Lupane, has the deepest and most unconsolidated sand deposits, with its grains being primarily quartz which happens to be already liberated since the sand is loose. Mudimbo et al recorded approximately 44 000 km² of lower pipe sandstone and Kalahari sands in this western region of Zimbabwe, with its depth going as far as 100 m.

This massive reserve ensures a long-term supply of silica sand for silicon production operations. The sand is loose, thus cheap open-cast mining methods can be implemented. The intermediate zone, Matobo, around Bulawayo, has an intermediate sand depth of 60 m. In this region, groundwater movement has dissolved and precipitated silica as a cementing agent. This process produces pipe sandstone, thus the region in pipe sandstone and hard silcrete layers. The eastern fringe, Gweru, Masvingo, has diminishing yet high silica content sand with an average depth of 30 m. The

dominant feature in this region is the underlying granite bedrock which happens to be rich in silica.

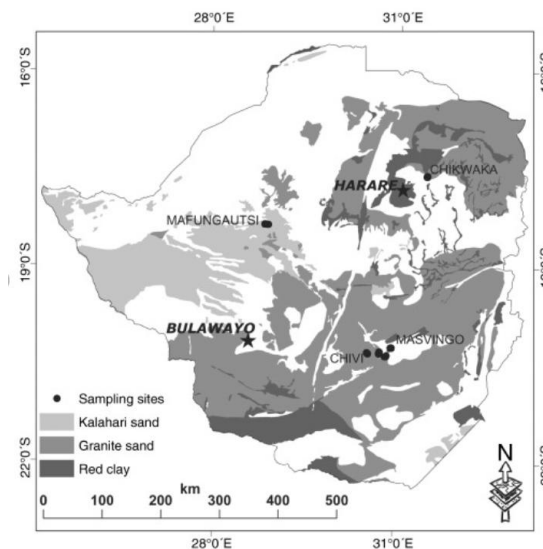


Figure 1 – Hydrogeology of Zimbabwe, 2022

Table 1 – Characterization of Zimbabwean silica sand

Element	Composition
Silica	92.38 %
Iron oxide	0.312 %
Aluminium oxide	0.49 %
Magnesium oxide	0.422 %
Calcium oxide	0.422 %
Titanium oxide	0.037 %

Table 1, shows high silica content of 92.38 % silica. This is an admirable content but falls short of the typical requirement which is about 98 %. The critical iron impurity of 0.312 % is a major concern, the level needs to be drastically reduced to the composition of 0.1 % to be a viable feedstock (Pachaly et al., 2022). The significant aluminum impurity of 0.49 % is again a major concern that needs to be reduced to values below 0.2 % (Luque & Hegedus, 2008). Other impurities have relatively low quantities that need to be reduced too. This composition of the Zimbabwe sand is admirable, with attrition scrubbing targeting aluminum impurities and sequential acid leaching aiming to eliminate the detrimental iron impurities (Liu et al., 2023; Long et al., 2024).

References

1. Formation of silicon layer through aluminothermic reduction of quartz substrates / M. M. Islam [et al.] // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. – Art. 977869.
2. Magniothermal Methods of Silicon Extraction from Quartz Sands of «Jerdanak» Mine / S. I. Jiyanova [et al.] // *J. Engineering Trends and Techn.* – 2024. – № 4. – P. 234–245.
3. A Review on Removal of Iron Impurities from Quartz Mineral / C. Liu [et al.] // *Minerals*. – 2023. – № 9. – Art. 1125.
4. Advanced Processing Techniques and Impurity Management for High-Purity Quartz in Diverse Industrial Applications / H. Long [et al.] // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14, № 6. – Art. 571.
5. Luque, A. Handbook of photovoltaic science and engineering / A. Luque, S. Hegedus. – Chichester: Wiley, 2008. – 1142 p.
6. Mohamed, N. I. Quantification of Silicon (Si) and Silicon Dioxide (SiO₂) from the Nafud Desert-Al-Qassim Region, Kingdom of Saudi Arabia Using XRD Analysis / N. I. Mohamed // *Advances in Materials Physics and Chemistry*. – 2024. – Vol. 14, № 5. – P. 67–75.
7. Silicon for The Chemical and Solar Industry XIII: proceedings of the 13th International Conference, Trondheim, Norway, June 21-24, 2016 / B. Pachaly [et al.]. – Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016. – 428 p.

UDC 681

THE NEXT FRONTIER: TRANSFORMING ZIMBABWE'S SILICA SAND INTO SMART TECHNOLOGY

Mbanje N., Govha J., Musiwa P. B.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. High-purity silicon is the cornerstone of modern electronics and solar technologies. This study investigates the potential of Zimbabwe's silica sand as a source of raw material for semiconductor-grade silicon. Samples from Mkoba, Gweru were analysed using Inductively Coupled Plasma (ICP) to determine elemental composition and impurity levels. Results show high silica content of 92.38 % with trace impurities such as iron, aluminium, magnesium, calcium and titanium. The findings indicate that, with appropriate purification processes, Zimbabwe's silica sand can serve as a viable feedstock for local semiconductor production and technological development.

Keywords: Silicon, semiconductor, Gweru, purity, photovoltaic, electronic, metallurgical.

Address for correspondence: Joseph Govha, BE277 Belvedere Harare, Zimbabwe
e-mail: jgovha@hit.ac.z

Introduction. High-purity silicon is the cornerstone of modern civilization, serving as the foundational substrate for semiconductor chips that power most digital electronics (Jennings *et al.*, 2024). Its role extends equally to the global energy sector, particularly in solar photovoltaic cells, underscoring its critical importance in both technological and energy landscapes (Asmaa and Saad, 2023; Jennings *et al.*, 2024). This ever-growing demand shifts focus to the foundational raw material, silica sand. The transformation of silica sand into silicon epitomizes one of the most vital value chains in contemporary industry (Tandersen *et al.*, 2024). Despite silicon being one of Earth's most abundant elements, it does not occur in native (elemental) form and must be produced via energy-intensive and highly selective chemical and metallurgical processes (Jiyanova *et al.*, 2024; Tandersen *et al.*, 2024). The quality of the silica has a profound influence on the efficiency, cost and environmental footprint of downstream silicon production (Asmaa and Saad, 2023). Among the challenges, silica seldom meets the impurity specifications required for semiconductor or photovoltaic applications (Khalifa *et al.*, 2025). Deep purification steps (physical, chemical, thermal) are needed to eliminate trace metal ions (e.g., Fe, Ti, Al), hydroxyl groups, and other contaminants before reduction to metallurgical-grade or higher purity silicon (Asmaa and Saad, 2023). In this sense, the "sand-to-silicon" chain is not just a matter of scale, but of achieving extreme purity with minimal losses, energy consumption, and environmental impact (Jennings *et al.*, 2024).

Gweru's silica sand composition. The ICP characterization as shown from Table 1 reveals that the silica sand from Gweru contains 92.38 % SiO₂, a relatively high silica content but well below the thresholds required for high-purity silicon feedstock. Of all the impurities, FeO (0.312 % which is approximately 3 120 ppm) is particularly problematic as iron tends to form colored inclusions and can act as a recombination center for charge carriers in silicon and photovoltaic devices, significantly impairing electrical performance. Zhang *et al.*, 2023; Long, Zhu, Pan, Li, Guo, *et al.*, 2024; Long, Zhu, Pan, Li, Yang, *et al.*, 2024).

Table 1 – ICP characterisation results of silica sand

Silica sand purity					
%SiO ₂	%FeO	%MgO	%CaO	%Al ₂ O ₃	%TiO ₂
92.38	0.312	0.422	0.098	0.49	0.057

According to standards for high-purity quartz, metallic impurity levels must often be reduced to single to low double digit ppm levels (e. g., the IOTA series quartz sands achieve impurity totals under 10 mg/kg). The Al₂O₃ content (0.49 %) is likewise high. Aluminum in quartz can substitute into the lattice, making removal difficult. It also contributes to defects in downstream silicon processing and optical transmission losses. Literature on purification of quartz emphasizes that lattice Al is one of the hardest impurities to eliminate (Long, Zhu, Pan, Li, Yang, *et al.*, 2024). Other impurities such as MgO (0.422 %), CaO (0.098 %) and TiO₂ (0.057 %) are lower, but still significant. Titanium is especially problematic because even trace Ti can diffuse during high temperature processing and cause deep-level electronic traps. The

presence of Mg and Ca is typically easier to remove via acid leaching or flotation, but their concentrations here remain non-negligible (Khalifa *et al.*, 2025).

Conclusion. The ICP characterization of Gweru's silica sand demonstrates promising yet imperfect purity for high-value applications. With 92.38 % SiO₂, the silica sand exhibits potential as a feedstock for silicon production but remains below the required purity for electronic-grade use. The elevated FeO (0.312 %) and Al₂O₃ (0.49 %) contents are the principal limiting factors, as these impurities degrade semiconductor performance and optical clarity. However, studies indicate that sequential acid leaching, magnetic separation, and flotation can effectively reduce Fe and Al impurities to acceptable limits (Liu *et al.*, 2023; Long *et al.*, 2024; Pachaly *et al.*, 2022). Therefore, with targeted beneficiation and purification technologies, Zimbabwe's silica sand could transition from a low-value construction material to a strategic mineral resource underpinning local semiconductor and photovoltaic industries.

References

1. Asmaa, Z. Extraction of silica from natural deposits for the production of silicon in photovoltaic applications / Z. Asmaa, H. Saad // Open Journal of Bacteriology. – 2023. – Vol. 7, № 1. – P. 011–015.
2. A review of high-purity quartz for silicon production in Australia / A. Jennings [et al.] // Australian Journal of Earth Sciences. – 2024. – Vol. 71, № 8. – P. 1085–1097.
3. Magniothermal Methods of Silicon Extraction from Quartz Sands of “Jerdanak” Mine / S. I. Jiyanova [et al.] // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2024. – Vol. 72, № 10. – P. 316–322.
4. High-Purity Silica Produced from Sand Using a Novel Method Combining Acid Leaching and Thermal Processing / M. Khalifa [et al.] // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2025. – Vol. 50, № 6. – P. 4129–4135.
5. Advanced Processing Techniques and Impurity Management for High-Purity Quartz in Diverse Industrial Applications / H. Long [et al.] // Minerals. – 2024. – № 6. – Art. 571.
6. Innovative process for the extraction of 99.99% high-purity quartz from high-silicon iron ore tailings / H. Long [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – P. 2094–2102.
7. Mudimbo, D. Hydrogeology of Zimbabwe / D. Mudimbo. – Harare: Geological Survey of Zimbabwe, 2018. – 245 p.
8. Extraction of Silicon from Silica Sand by Carbothermic Reduction in Mini DC-EAF / D. Tandersen, L. Müller, P. Schmidt [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 543. – Art. 02006.
9. Research Status and Challenges of High-Purity Quartz Processing Technology from a Mineralogical Perspective in China / R. Zhang, W. Li, X. Chen [et al.] // Minerals. – 2023. – Vol. 13, № 12. – Art. 1505.

UDC 681

EFFECTS OF DEAD-TIME IN DUAL ACTIVE BRIDGE

Machongwe T., Musiiwa P. B., Mutamba C. T., Makusha D. T., Kapuya E. T., Musadamba D.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. The article explores the effect of dead-time in the operation of a Dual Active Bridge (DAB). DABs consist of high-speed switching devices (usually MOSFETs) as the main architecture component. The switches turn off and on at frequencies greater than 50 MHz. During this switching period, switches change from their low state to high state. If the fall time is greater than the time between switching changes, a short circuit is created leading to the damage of the switching devices. Therefore, it is very important to critically analyze the effect of dead-time during the design of the dual active bridge topology.

Keywords: dual active bridge, dead-time, bidirectional converters.

Address for correspondence: Peter B. Musiiwa, BE277 Belvedere Harare Zimbabwe
e-mail: pbmusiiwa@hit.ac.zw

Introduction. A dual active bridge is a commonly used topology in the development of dc-dc converters. It comprises two PWM controlled active primary and secondary full H-bridges, connected through a high-frequency transformer.

The primary function of the DAB is to facilitate controlled, bidirectional power flow between two DC sources or loads, such as a battery and a DC bus, while providing galvanic isolation. This makes it exceptionally suitable for applications like electric vehicle charging, renewable energy integration, solid-state transformers, and aerospace power systems. As can be observed from Figure 1, there are four power switches on each side of the high-frequency transformer, and the transformer provides isolation between the primary and secondary sides. Controlling the magnitude and direction of the phase shift between the four bridge arms, energy flows between the two DC power sources.

Dead time effect. The dead time effect is a phenomenon during the switching transition; this event is deliberately included during the switching phases in which both switches in a half bridge are commanded to be in the OFF state. The fundamental and most critical reason for implementing dead time is to prevent a condition known as shoot-through or cross-conduction. Another important reason for implementing the dead time phenomenon is its ability to create a safety margin. Hence it accounts for the non-ideal characteristics of real-world components. Shoot-through is a fault that occurs when both the high side and low side switches in a leg are turned ON simultaneously, even for a very short time [1, 2]. This creates a low-impedance path directly from the DC supply rail to ground, resulting in a very high, destructive surge of current that can permanently damage the semiconductor switches. Effects of increasing deadtime Power Transfer Reduction: As

dead time increases from 50 ns to 400 ns, the power output drops from 605 W to 586 W, a reduction of over 20 %. This confirms that the distorted voltage waveform reduces the effective voltage-time product available for power transfer [3]. The relationship can be approximated by the following equation, which modifies the ideal power transfer equation to account for dead time [4].

$$P_{out} = \frac{V_{in} \cdot V_{out}}{\omega L_{lk}} \delta \left(1 - \frac{2T_d}{T_{sw}/2} \right), \quad (1)$$

where T_{sw} is the switching period, L_{lk} is the leakage inductance.

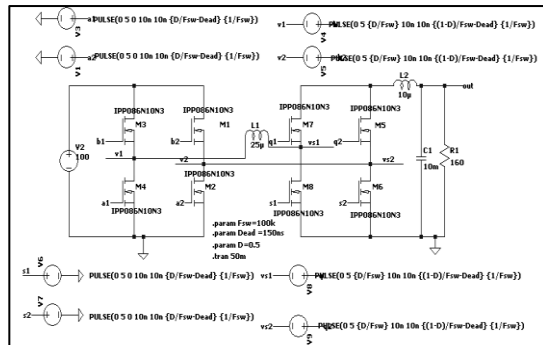


Figure 1 – Basic structure of a DAB topology

Efficiency Degradation: Efficiency follows a similar declining trend, falling from 96.2 % to 88.5 %. This is a direct consequence of several factors such as, increased conduction losses due to extended body diode conduction, the loss of ZVS at higher dead times, and higher RMS currents (evident from the rising peak current) leading to increased conduction losses [5].

Loss of Zero-Voltage Switching (ZVS): The data shows a critical point between 200 ns and 300 ns where ZVS is lost for the leading bridge leg. As dead time is extended beyond the point where the inductor current has fully commutated to the body diode and begun to decay, the conditions for ZVS are destroyed.

This transition to hard switching is a primary contributor to the sharp decline in efficiency observed at higher dead times [6].

Increased Current Stress: The peak current in the switches increases with dead time. To compensate for the reduced power transfer per phase shift angle, the control system would typically increase the phase shift command (δ) to maintain a constant power level. This larger phase shift inherently results in higher circulating currents and increased current stress on the semiconductor devices [7].

Table 1 – Performance Metrics vs. Dead Time

Dead Time, T_d (ns)	Output Power, P_{out} (W)	Efficiency, E (%)
50	605	96.2
100	598	95.8
200	592	94.0
300	588	91.2
400	586	88.5

References

1. Mohan, N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. – New York: John Wiley & Sons, 2003. – 802 p.
2. Erickson, R. W. Fundamentals of Power Electronics / R. W. Erickson, D. Maksimović. – New York: Springer Science & Business Media, 2001. – 883 p.
3. Performance Characterization of a High-Power Dual Active Bridge DC-to-DC Converter / M. H. Kheraluwala [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28, № 6. – P. 1294–1301.
4. Dead-Time Effect Compensation for a Dual Active Bridge DC-DC Converter / G. G. Oggier [et al.] // 2018 IEEE ICIT. – 2018. – P. 1831–1836.
5. Krismer, F. Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters / F. Krismer, J. W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, № 1. – P. 174–188.
6. Inoue, S. A Bidirectional DC-DC Converter for an Energy Storage System with Galvanic Isolation / S. Inoue, H. Akagi // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, № 6. – P. 2299–2306.
7. Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System / B. Zhao, [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – № 8. – P. 4091–4106.

UDC 681

EFFECTS OF PHASE SHIFTING IN DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB) CONVERTERS

Mutamba C. T., Musiiwa P. B., Machongwe T.,
Chimonyo K. B., Kapuya E. T., Musademba D.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper analyses the effects of phase shifting in Dual Active Bridge (DAB) converters, which are widely applied in electric vehicle chargers, renewable integration, and solid-state transformers. Its symmetrical topology, comprising two full-bridge converters linked by a high-frequency transformer and controlled through phase-shift modulation, enables seamless power flow in both directions with galvanic isolation. The direction of power flow and magnitude is determined by which bridge that leads or lags. This study outlines the effects of phase shifting between the two bridges to provide the comparison on the output voltage and current at different phase angle.

Keywords: dual active bridge, phase shift, bidirectional converters, output current, power transfer.

Address for correspondence: Peter B. Musiiwa, BE277 Belvedere Harare Zimbabwe
e-mail: pbmusiiwa@hit.ac.zw

Introduction. The increasing adoption of electric vehicles (EVs) and renewable energy systems demands high-efficiency bidirectional DC–DC power converters. The Dual Active Bridge (DAB) topology has emerged as a leading solution due to its galvanic isolation, high power density, and controllability. Unlike conventional DC–DC converters, the DAB regulates power flow through phase shifting of high-frequency bridge signals instead of duty cycle control. This makes it especially suitable for fast, dynamic applications such as vehicle-to-grid (V2G) and energy storage systems. This paper presents an overview of the DAB's analyses on the effects of phase shift control on voltage and current waveforms.

Principle of Operation Dual Active Bridge. A DAB converter consists of two full-bridge inverters connected through a high-frequency transformer with leakage inductance. Each bridge converts DC input into square-wave AC signals, which are transferred through the transformer before being rectified back to DC. The key control parameter is the phase shift (ϕ) between the primary and secondary bridge voltages. The transferred power can be expressed with

$$P = \frac{V_{in}V_{out}\phi}{WL\pi}, \quad (1)$$

where V_{in} is the input voltage, V_{out} the output voltage, L the transformer leakage inductance, and W the angular switching frequency. This quadratic relationship shows that by adjusting ϕ which is the phase angle between the two bridges, the output power can be continuously regulated.

Effects of Phase Shifting on Output Voltage and Current. In a Dual Active Bridge, power transfer is governed by the phase difference between the switching signals of the primary and secondary bridges. When a phase shift is introduced, it creates a voltage difference across the transformer's leakage inductance, which drives current flow between the two sides. The size and direction of this phase shift determine both the magnitude and direction of power transfer. A positive phase shift causes energy to flow from the primary side to the secondary, while a negative shift reverses the flow. Increasing the phase angle allows more power to be delivered, whereas reducing it lowers the transfer.

Leading Phase Shift – If the secondary bridge leads, the DAB delivers power back to the input side. The secondary current waveform becomes shifted ahead, indicating reverse power transfer. This mode is critical in bidirectional systems such as V2G.

Lagging Phase Shift – If the secondary bridge lags, the DAB transfers power from source to load. The current aligns with the input voltage, producing forward power transfer. However, excessive lag increases RMS current stress and conduction losses.

The simulated waveforms of the Dual Active Bridge show that phase shifting directly controls both the direction and magnitude of power transfer. At -90° and -45° , the inductor current flows in the negative direction, indicating reverse power flow from the secondary to the primary, with -90° giving maximum

reverse transfer. At 0° , the primary and secondary voltages are in phase, no net voltage appears across the leakage inductance, and current is nearly zero, meaning no power is exchanged. For positive shifts of $+45^\circ$ and $+90^\circ$, the inductor current flows positively, corresponding to forward power transfer from the primary to the secondary, with $+90^\circ$ producing the maximum transfer. In summary, negative shifts drive reverse flow, zero shift halts transfer, and positive shifts enable forward flow, with the magnitude of current and power increasing as the phase angle approaches $\pm 90^\circ$. In summary, negative shifts drive reverse flow, zero shift halts transfer, and positive shifts enable forward flow, with the magnitude of current and power increasing as the phase angle approaches $\pm 90^\circ$.

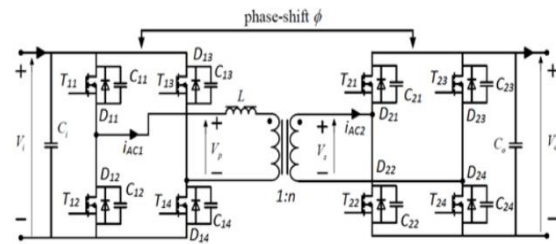


Figure 1 – Basic block diagram of a Dual Active Bridge converter

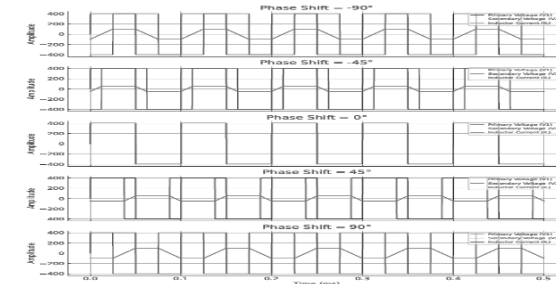


Figure 2 – Voltage and current waveforms under lagging and leading phase shift conditions

Conclusion. The study demonstrates that phase shift modulation in DAB converters provides effective control of bidirectional power transfer. Leading and lagging phase shifts correspond to reverse and forward power flow, respectively. However, improper selection of phase shift can increase current stresses and reduce efficiency. Overall, phase shifting remains a robust technique for modern isolated DC–DC conversion in EV and renewable energy systems.

References

1. A three-phase soft-switched high power density DC/DC converter for high power applications / R. W. De Doncker [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27, № 1. – P. 63–73.
2. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC–DC converter for high-frequency-link power-conversion system / B. Zhao [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – № 8. – P. 4091–4106.
3. Wu, H. A family of dual-active-bridge isolated bidirectional DC–DC converters with different voltage gain / H. Wu, Y. Xing // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, № 2. – P. 1147–1160.

UDC 681

WEARABLE RADIATION DETECTION SYSTEM FOR ZIMBABWE AIRPORTS

Mukwewa T. M.¹, Musiiwa P. B.¹, Zwavashe T.²,
Rushambwa M. C.¹, Makusha D. T.¹, Chimonyo K. B.¹¹Harare Institute of technology²Scientific and Industrial Research and Development Centre
Harare, Zimbabwe

Abstract. This research paper focuses on the design and implementation of a wearable radiation detection system in Zimbabwe airports. With the increase in radiation emitting designs and technologies for security, airport personnel and passengers are at risk due to their exposure to the radiation. This paper aims to solve and minimize this risk, hence providing a wearable radiation detection system to protect workers and passengers. The system detects radiation in real-time, providing alerts and data logging for safety compliance. The design aligns with International Civil Aviation Organization (ICAO) safety standards.

Keywords: Wearable system, radiation, airport safety, ICAO standards, Zimbabwe, X-ray, radar, occupational health.

Address for correspondence: Peter B. Musiiwa, BE277 Belvedere Harare Zimbabwe
e-mail: pbmusiiwa@hit.ac.zw

Introduction. Radiation emitting technologies such as radar and X-ray scanners are integral to modern airport operations. In Zimbabwe, as in many developing nations, adopting such systems has outpaced the implementation of robust safety monitoring mechanisms. While these technologies enhance security, they also pose health risks to airport workers and frequent travelers due to prolonged exposure. The International Civil Aviation Organization (ICAO) mandates radiation safety protocols, yet enforcement and monitoring remain inconsistent across African airports.

This paper proposes a wearable radiation detection system for Zimbabwean airport environments. The system aims to provide real time monitoring of X-ray radiation, ensuring compliance with ICAO safety standards and protecting the health of airport personnel and passengers.

Review. Airport security systems commonly use millimeter wave scanners and cabinet X-ray machines for screening. These devices emit ionizing and non-ionizing radiation which if not properly managed can lead to cumulative health effects, including tissue damage and increased cancer risk. ICAO Annex 14 and Annex 17 outline safety and security protocols, including radiation exposure limits and protective measures. These standards emphasize the need for radiation monitoring, personnel training, and equipment certification. However, implementation in Zimbabwe is challenged by limited resources and technical expertise. Recent advances in flexible electronics and nanomaterials have enabled the development of wearable radiation detectors. Materials such as lead-free photoferroelectrics perovskites offer high sensitivity and flexibility, making them suitable for integration into garments.

Proposed radiation detection system. The design of a wearable radiation detection system for Zimbabwean airports requires a multidisciplinary approach that integrates advanced sensor materials, embedded electronics, wireless communication, and user-friendly software interfaces to ensure real-time monitoring and compliance with International Civil Aviation Organization (ICAO) safety standards. At the heart of the

system is a flexible sensor array composed of Lead-Free Photoferroelectric Perovskite Membranes (LFPPM), which are selected for their high sensitivity to ionizing radiation such as X-rays and their environmental safety compared to traditional lead-based sensors. These hybrid metal halide perovskites operate via the photoferroelectric effect, converting incident radiation into electrical signals that are proportional to the intensity and duration of exposure. The sensor array is embedded into a textile armband, allowing for unobtrusive wear and continuous monitoring in airport environments. The electrical signals generated by the LFPPM sensors are routed to an ARM Cortex-M4 microcontroller, which serves as the central processing unit of the system. This microcontroller is chosen for its low power consumption, real-time analog to digital conversion capabilities, and integrated digital signal processing (DSP) features, making it ideal for wearable applications. It processes the incoming data to compute exposure metrics, filter noise, and manage system logic for triggering alerts and transmitting data. For wireless communication, the system employs XBee modules based on the Zigbee protocol, enabling secure, low-latency transmission of radiation data to a paired mobile application or central monitoring station. These modules support mesh networking, which is particularly useful for coverage across large airport zones, and AES encryption to ensure data security. Powering the system is a rechargeable lithium-ion battery, selected for its high energy density and lightweight profile, with an integrated battery management system (BMS) to ensure safe operation and longevity. A compact OLED screen is incorporated into the armband to provide immediate visual feedback to the wearer, displaying current radiation levels, alert status, and battery life. OLED technology is preferred for its low power draw and high visibility in various lighting conditions. An Alarming system is also incorporated into the system to alert the user the moment they get exposed to the radiation and it also incorporates LEDs that signal red for danger and green for safety. On the software side, a mobile application developed in Python using a custom Tkinter GUI serves as the user interface for real time

visualization, historical data logging, and ICAO compliant reporting. The app receives data via the XBee module and stores it in a secure local database, generating alerts through visual and auditory cues when exposure exceeds safe limits. It also supports exporting audit ready reports for occupational health compliance, making it a valuable tool for both individual safety and institutional oversight.

Field trials conducted at Robert Gabriel Mugabe International Airport demonstrated the system's effectiveness in detecting radiation spikes during baggage scanning, successfully triggering alerts and logging data. Airport personnel reported increased confidence in safety protocols and improved awareness of radiation risks. Below is the abstract block diagram of the system.

Simulation results and performance comparison. A prototype arm band was developed using textile-integrated sensors and tested in simulated airport environments. Radiation sources included a cabinet X-ray scanner. Sensors were calibrated using known radiation sources. The system demonstrated sensitivity thresholds of:

X – ray: $0.01 \mu\text{Sv/h}$;

Radar: $0.1\text{mW}/(\text{cm}^2)$.

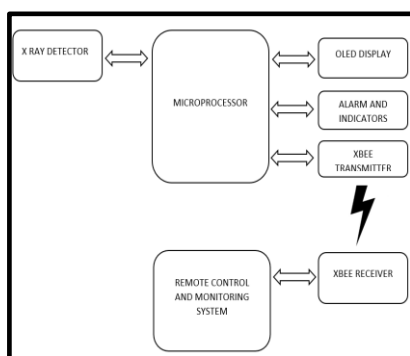


Figure 1 – Radiation Detection System Block Diagram

Field trials were conducted at Harare International Airport. The system successfully detected radiation spikes during baggage scanning and radar sweeps, triggering alerts and logging data. The system supports ICAO compliance by monitoring exposure levels, generating ready audit reports and providing real time alerts to prevent overexposure. Airport workers wearing the system reported increased awareness and confidence in their safety. The system enables proactive risk management and supports health surveillance programs. Sensor degradation due to humidity and mechanical stress remains a challenge. Future work

will focus on encapsulation techniques and robust textile integration. Cost-effective mass production and integration into standard uniforms are necessary for widespread adoption. Collaboration with Civil Aviation Authority of Zimbabwe (CAAZ) and ICAO is essential for policy alignment and certification.

Conclusions. The wearable radiation detection system offers a practical solution to enhance safety in Zimbabwean airports. By aligning with ICAO standards and leveraging advanced sensor technology, the system empowers workers and protects passengers from radiation risks. Its successful implementation could serve as a model for other developing nations seeking to modernize aviation safety infrastructure.

References

1. International Civil Aviation Organization. Annex 14: Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference. – Montreal: ICAO, 2023. – 284 p.
2. The Herald. ICAO-backed reforms modernize Zimbabwe aviation sector. – Harare: The Herald, 2023.
3. Standards Association of Zimbabwe. National Standards Catalogue. – Harare: SAZ, 2023. – 156 p.
4. World Health Organization. Ionizing Radiation: Health Effects and Risks. – Geneva: WHO, 2022. – 18 p.
5. Flexible Radiation Sensors Using Perovskite Materials / J. Chen [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2023. – № 4. – P. 1123–1130.
6. Radiation Exposure in Airport Workers: A Review / J. Smith [et al.] // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. – 2023. – № 2. – P. 85–94.
7. National Institute for Occupational Safety and Health. Radiation Safety Guidelines for Airport Environments. – Washington: NIOSH, 2022. – 45 p.
8. Kumar, A. Textile-Integrated Radiation Sensors for Wearable Applications / A. Kumar, L. Zhao // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2023. – Vol. 376. – P. 132–140.
9. Ministry of Transport and Infrastructural Development. Harare International Airport Infrastructure Report. – Harare: Government of Zimbabwe, 2022. – 89 p.
10. Wearable photoferroelectrics perovskite X-ray detectors using lead-free hybrid metal halide membranes / Y. Zhang [et al.] // Perovskite-Info. – 2023.
11. Halide Perovskite Films for Ionizing Radiation Detection: An Overview of Novel Solid-State Devices / N. Falsini [et al.] // Sensors. – 2023. – № 10. – Art. 4930.
12. Basiricò, L. Editorial: Perovskite and Organic Materials for Radiation Detectors / L. Basiricò, G. Yang, P. Sellin // Frontiers in Physics. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1242329.
13. Kumar, A. Textile-Integrated Radiation Sensors for Wearable Applications / A. Kumar, L. Zhao // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2023. – Vol. 376. – P. 132–140.
14. Radiation Exposure in Airport Workers: A Review / J. Smith [et al.] // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. – 2023. – № 2. – P. 85–94.

UDC 681

SUSTAINABLE RECOVERY OF HIGH-PURITY AMORPHOUS SILICA FROM LOCAL SAND DEPOSITS IN ZIMBABWE USING CITRIC ACID LEACHING PRE-TREATMENT

Mutsata K., Govha J., Musiiwa P. B., Moyo L.

Harare Institute of technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This study presents an alternate process for utilization of Zimbabwean silica sand to produce high-purity amorphous silica. The objective was to develop an optimum multi-stage purification that is environmentally friendly. The methodology starts with pre-treatment step with hydrochloric acid, followed by citric acid chelation

stage to remove metallic oxide impurities. The pre-treated silica sand was then converted into sodium silicate intermediate through digestion with sodium hydroxide, from which high-purity silicic acid was precipitated using sulfuric acid. Studies on the chelation stage identified the optimal conditions for maximum impurity removal as a citric acid concentration of 4 M, a leaching duration of 4 hours, and a solid-to-liquid ratio of 1:4, all conducted at a temperature of 90 °C. Under these conditions, 70.3 g of high-purity amorphous silica was obtained from 100 g of silica sand. The results demonstrate that this approach, using organic acid leaching with a chemical conversion and precipitation route, represents a viable and effective pathway for upgrading lower-grade silica resources into a high-value precursor material suitable for semiconductor applications.

Keywords: High-purity silica, Amorphous silica, Zimbabwean sand, Citric acid leaching, precipitated.

Address for correspondence: Joseph Govha2, BE277 Belvedere Harare, Zimbabwe
e-mail: jgovha@hit.ac.zw

Introduction. “High-purity silica (SiO_2 , >99.8 %) is important for modern technologies, as the precursor for semiconductor-grade silicon used in microprocessors, memory chips, and other electronic devices [1, 2]. Demand for high-purity silica is rising due to renewable energy, 5G, and consumer electronics, yet naturally occurring quartz meeting strict purity standards remains limited [4, 7]. Focus on current research is on upgrading lower-grade silica sands, which contain impurities like Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , and alkali metals [9]. These contaminants can severely degrade the performance of the final products even at trace levels. Hence the need to develop a robust and economically viable purification pathway. Traditional purification strategies are aggressive and detrimental to the environment, including high-temperature chlorination and leaching with strong mineral acids like hydrofluoric (HF) and sulfuric acid (H_2SO_4) [10]. Whilst effective, conventional processes are costly and hazardous, prompting the search for sustainable alternatives. This study explores purification using citric acid, a biodegradable chelating agent [13]. The leaching step is coupled with a subsequent conversion of the purified silica into a water-soluble sodium silicate intermediate. This chemical transformation, a cornerstone of industrial silicate production [14], facilitates a phase-separation purification, allowing for the removal of acid-insoluble mineral impurities before the final precipitation of high-purity amorphous silica. Transforming a relatively low-value raw mineral into a high-value industrial precursor can enhance economic returns and strengthen domestic supply chains for critical materials [8].

Experimental Procedure

Materials. Silica sand from Zimbabwe was used as the primary raw material. Analytical grade reagents (HCl 37 %, citric acid $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, NaOH, and H_2SO_4 98 %) were used without further purification, and distilled water was employed for all solution preparations and washing.

Parametric Optimization of Citric Acid Chelation. A number of batch experiments were conducted to determine the best conditions for the removal of impurities using citric acid. For each experiment, a consistent starting mass of 20.00 g of sand, previously subjected to washing and HCl pretreatment, was used. The leaching process was carried out in a temperature-controlled reaction vessel with continuous stirring. The extent of impurity removal was quantified by gravimetric analysis, calculated using the equation:

$$\text{Impurity Removal} = \frac{((\text{Initial Mass} - \text{Final Mass}))}{(\text{Initial Mass})} \times 100.$$

Experiment 1: Effect of Citric Acid Concentration

The effect of acid concentration on impurity removal was investigated by varying the molarity of the citric acid solution (1.0 M, 2.0 M, 3.0 M, 4.0 M, and 4.8 M). The following conditions were held constant: solid-to-liquid (S:L) ratio of 1:4, leaching time of 3 hours, and temperature of 90 °C [16].

Experiment 2: Effect of Leaching Time.

To determine the optimal reaction duration, the leaching time was varied (1, 2, 3, 4, and 5 hours). The experiment was conducted using the optimal concentration determined from the previous step (4.0 M citric acid), while maintaining a constant S:L ratio of 1:4 and a temperature of 90 °C [16].

Experiment 3: Effect of Solid-to-Liquid Ratio

The influence of the S:L ratio was examined by varying the ratio between the mass of sand and the volume of the leaching solution (1:1, 1:2, 1:3, 1:4, and 1:5). This series of tests was performed using the previously determined optimal conditions of 4.0 M citric acid and a 4-hour leaching time, at a constant temperature of 90 °C [16].

Results and Discussion.

Optimization of Impurity Removal by Citric Acid Leaching. The results of the parametric studies demonstrate a clear and systematic relationship between the leaching conditions and the efficiency of impurity removal.

Effect of Citric Acid Concentration. The first experiment showed that increasing citric acid concentration from 1.0 M to 4.0 M raised impurity removal from 1.50 % to 9.50 %, after which no further improvement was observed up to 4.8 M. The trend reflects enhanced chelation of Fe^{3+} and Al^{3+} impurities by citrate ions, with the levelling off at 4.0 M indicating equilibrium or limitations due to residual impurities.

Effect of Leaching Time. Experiment on effect of Leaching Time showed impurity removal rising from 2.50 % at 1 h to 10.00 % at 4 h, with only a slight increase to 10.15 % at 5 h. This indicates most surface impurities are removed within 4 h, after which leaching nears completion.

Effect of Solid-to-Liquid Ratio. Experiment showed that decreasing the S:L ratio from 1:1 to 1:4 improved impurity removal from 3.00 % to 11.00 %, with no further gain at 1:5. The optimal conditions were identified as 4.0 M citric acid, 4 h leaching, and an S:L ratio of 1:4. The plateaus observed suggest

a leaching limit, with remaining impurities likely trapped in the quartz lattice or protected as mineral inclusions [7, 16].

Efficacy of the Integrated Purification Process.

The 100 g scaled-up experiment provides a quantitative assessment of the entire purification flowsheet. The mass balance at each stage is summarized in tab. 1.

Table 1 – Mass Balance for the Production of Amorphous Silica from 100 g of Sand

Stage	Condi-tions	Mass Balance Result	Mass Loss (g)	Cumulative Mass Loss (%)
Initial Sam-ple	100 g raw sand	100.0 g	–	0.0 %
After Washing	Washed with dis-tilled wa-ter, dried at	98.0 g	2.0	2.0 %
After HCl Pretreatme-nt	3 M HCl, 3 h, S:L = 1:4	94.7 g	3.3	5.3 %
After Citric Acid Chela-tion	4.0 M cit-ric acid, 4 h, S:L = 1:4	92.6 g	2.1	7.4 %

Mass balance analysis showed sequential impurity removal: 2.0 % by washing, 3.3 % by HCl pretreatment, and 2.1 % by citric acid leaching, totaling 7.4 g from 100 g sand. The sodium silicate step enabled selective dissolution–precipitation, separating silica from insoluble impurities. Digestion achieved 88.4 % efficiency, with 81.9 g silica reacted, yielding 70.3 g amorphous silica (75.9 % recovery). Overall, the process was effective, though digestion and precipitation remain key targets for optimization [14, 18].

Conclusion. This study developed a multi-stage hydrometallurgical process to purify Zimbabwean silica sand into high-purity amorphous silica. The results show that this integrated approach is promising, economically viable, and adds value to low-grade Zimbabwe silica resources, with potential applications in semiconductor industry.

References

1. Geoscience Australia. High purity silica mineral systems study. – Canberra: Geoscience Australia, 2023. – URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/australian-critical-minerals-research-and-development-hub/high-purity-silica-mineral-systems-study> (date of access: 15.11.2024).
2. Fact.MR. High purity silica market size & industry statistics 2034. – Rockville: Fact.MR, 2024. – URL: <https://www.factmr.com/report/622/high-purity-silica-market> (date of access: 15.11.2024).
3. Zimtu Capital Corp. High purity silica: A versatile material. – Vancouver: Zimtu Capital Corp., 2023. – URL: <https://www.zimtu.com/high-purity-silica-a-versatile-material/> (date of access: 15.11.2024).
4. Investing News Network. High-purity silica: Key material powering tech, solar and investment growth. – Vancouver: Investing News Network, 2024. – URL: <https://investingnews.com/high-purity-silica-key-material-powering-tech-solar-and-investment/> (date of access: 15.11.2024).
5. CAPLINQ Corporation. High purity silica | Fine & specialty chemicals. – Amhem: CAPLINQ Corporation, 2023. – URL: <https://www.caplinq.com/high-purity-silica.html> (date of access: 15.11.2024).
6. PVBuzz. Industrial applications of high purity silicon material. – Berlin: PVBuzz Media, 2024. – URL: <https://pvbuzz.com/industrial-silicon-material/> (date of access: 15.11.2024).
7. Research status and challenges of high-purity quartz processing technology from a mineralogical perspective in China / R. Zhang [et al.] // Minerals. – 2023. – № 12. – Art. 1505.
8. Innovation News Network. Responsibly sourcing silica sand to meet global demand. – London: Innovation News Network, 2024. – URL: <https://www.innovationnewsnetwork.com/responsibly-sourcing-silica-sand-meet-global-demand/23979/> (date of access: 15.11.2024).
9. Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications / H. Long [et al.] // Minerals. – 2024. – № 6. – Art. 571.
10. Intel Market Research. High purity silica market outlook 2025-2031. – New York: Intel Market Res., 2024. – URL: <https://www.intelmarketresearch.com/chemicals-and-materials-563> (date of access: 15.11.2024).
11. Iron and aluminium removal from Algerian silica sand by acid leaching / A. Bourokba, S. Guerrou, R. Kherfi [et al.] // ResearchGate. – 2017. – 12 p.
12. Impurity removal process for high-purity silica production by acid leaching / M. Yamamoto [et al.] // EPJ Web of Conferences. – 2012. – Vol. 25. – Art. 00014.
13. Data Insights Market. High purity silica sand market drivers and challenges: Trends 2025-2033. – Pune: Data Insights Market, 2024. – URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/high-purity-silica-sand-1814624> (date of access: 15.11.2024).
14. CEES Silicates. Manufacture. – Brussels: CEES Silicates, 2023. – URL: <https://www.cees-silicates.org/index.php/manufacture> (date of access: 15.11.2024).
15. U.S. Environmental Protection Agency. Water treatment chemical supply chain profile – Sodium silicate. – Washington: EPA, 2023. – 45 p.
16. A review on removal of iron impurities from quartz mineral / C. Liu [et al.] // Minerals. – 2023. – № 9. – Art. 1128.
17. Process for purifying silica sand: pat. 4401638 USA / B. R. Aude, T. R. Cunningham. – 6 p.
18. Marsina Engineering srl. Sodium silicate plant. – Bucharest: Marsina Engineering, 2024. – URL: <https://www.marsina.com/sodium-silicate-plant/> (date of access: 15.11.2024).

UDC 681

AN INVESTIGATION INTO THE POWER-PERFORMANCE TRADE-OFF IN MEMRISTOR-AUGMENTED SENSE AMPLIFIERS FOR NANOSCALE SRAM

Musiwa P. B.¹, Rushambwa M. C.¹, Gwamuri J.¹,
Kanhukamwe Q. C.¹, Tyavlovsky A.², Svistun A. I.²

¹ Harare Institute of technology, Harare, Zimbabwe

² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. As technology ramps up to high nodes, SRAM sense amplifiers struggle suffer from increasing static power. The paper proposes memristors as non-volatile, tunable loads in cross-coupled differential sense amplifiers

as a remedy. Simulation in a 45 nm node reveals 69.2 % leakage power reduction, making the solution appealing for low-power usage. The static power reduction comes at the expense of 12 % and 52.5 % elevated dynamic power and output noise at 1.2 V respectively. Hence, the memristor-based design is best suited for low-duty-cycle, leakage-critical applications and not as generalised CMOS replacement, dictating application-specific power-performance co-design.

Keywords: Memristor, Sense amplifier, SRAM.

Address for correspondence: Peter Bukelani Musiiwa, BE277 Belvedere Harare, Zimbabwe

e-mail: pbmusiiwa@hit.ac.zw

Introduction. As transistor miniaturization challenges conventional SRAM sense amplifiers, causing degraded performance and higher leakage, memristors offer a promising solution as load elements. This work presents a 45 nm case study of a memristor-loaded sense amplifier that achieves a significant reduction in static power and delay. However, these gains are offset by increased dynamic power and degraded signal integrity. The results highlight the critical importance of application-specific co-design when integrating emerging devices with standard CMOS technology.

Sense Amplifier Architectures and Memristor Modeling.

This paper compares a traditional CMOS sense amplifier with a hybrid design that uses memristive loads. While both topologies share a core cross-coupled inverter, the proposed circuit replaces the conventional PMOS active loads with two memristors that serve as the primary pull-up elements. This key topological change is the basis for the performance analysis [2, 5].

Memristive Load Analysis.

The performance shifts in the propounded topology emanates from the relationship of voltage gain (AV) and output resistance (Rout), input differential pair transconductance gm expressed as:

$$A_V = -g_m R_{out}. \quad (1)$$

In the traditional design, Rout is set by the parallel output resistances of NMOS and PMOS devices while for proposed memristor-loaded design, it is parallel combination of the differential pair's resistance and the mem-resistance (M).

$$R_{out} = r_{out(differential\ pair)} // r_{o(load)} + M. \quad (2)$$

The amplifier's gain is a function of the memristor state ($AV \propto M$). Since M varies with flux (ϕ) or charge

(q), it can be tuned between high (ROFF) and low (RON) states, directly affecting gain and leakage [1].

Comparative Simulation and Analysis.

To compute the performance trade-offs, sense amplifiers circuits were simulated on Cadence Virtuoso tool (45 nm) suite at 27 °C. The memristor were modelled with titanium dioxide-based devices constraints characteristics of: a low-resistance, $R_{ON} = 100 \Omega$, a high-resistance, $R_{OFF} = 1600 \Omega$, and ion mobility of $\mu = 1e^{-13} m^2 S^{-1} V^{-1}$. The simulations were done at 0.7 V and 1.2 V. The results is presented in Table 1.

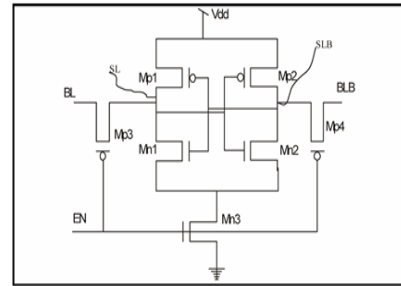


Figure 1 – Conventional CMOS Design

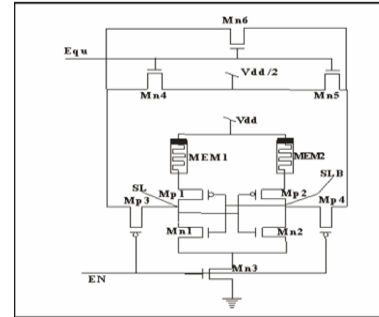


Figure 2 – Proposed Memristor-Loaded Design

Table 1 – Performance parameters at 0.7 V and 1.2 V

Parameter		Conventional	Proposed	% Change
Delay (ns)	0.7 V	25.03	23.2	-7.3 %
	1.2 V	20.3	19.36	-4.6 %
Average Power(μ W)	0.7 V	10.6	11.67	+10.1 %
	1.2 V	13.2	14.81	+12.2 %
Leakage Power(nW)	0.7 V	78	24	-69.2 %
	1.2 V	162	49.8	-69.2 %
Output Noise ()	0.7 V	0.897	1.138	+26.9 %
	1.2 V	0.932	1.421	+52.5 %
Voltage Swing (Max)	0.7 V	0.689 V	0.534 V	-22.5 %
	1.2 V	1.183 V	1.03 V	-12.9 %

Trading Static for Dynamic Power. The simulation results reveal a clear power consumption trade-off. The memristor-loaded amplifier's primary advantage is a 69.2 % reduction in leakage power, as the memristor's high off-state resistance effectively gates leakage current during idle periods. This makes the design highly suitable for applications where static power is a dominant concern. However, this static power benefit is coupled with a 10–12 % increase in average power during operation. This higher dynamic power is a direct consequence of the circuit's enhanced performance, as its faster response and higher gain require larger transient currents, effectively trading static power efficiency for improved speed [3, 6].

Speed vs. Signal Integrity.

The proposed design improves speed at the cost of signal fidelity. While sensing delay is reduced by up to 7.3 % due to higher gain from the memristive loads, this enhancement degrades signal integrity. The maximum output voltage swing is cut by 22.5 % due to an inherent voltage drop across the memristor. More critically, output noise increases by 52.5 %, as the stochastic physical process within the memristor introduces intrinsic noise that the amplifier's higher gain then magnifies. Therefore, the desirable speed improvement and detrimental noise increase are fundamentally linked in this design [4].

Discussion and Conclusion. The memristor-loaded sense amplifier is not a universal improvement over CMOS but a specialized design with clear trade-offs. Its primary advantage is a 69.2 % reduction in

leakage power, making it ideal for low-duty-cycle applications like IoT devices where static power is the main concern. However, it is poorly suited for high-performance computing due to increased dynamic power and degraded noise margins. In conclusion, integrating memristors requires a co-design paradigm, matching the device's unique properties to specific application needs. Future research should focus on mitigating its dynamic power and noise penalties while retaining its static power benefits.

References

1. Williams, R. How We Found The Missing Memristor / R. Williams // IEEE Spectrum. – 2008. – Vol. 45, № 12. – P. 28–35.
2. Ho, Y. Nonvolatile memristor memory: Device characteristics and design implications / Y. Ho, G. Huang, P. Li // Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD). – 2009. – P. 485–490.
3. Shin, S. Memristor-based fine resolution programmable resistance and its applications / S. Shin, K. Kim, S. Kang // 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems. – 2009. – P. 948–951.
4. Wang, N. On the design of MOS dynamic sense amplifiers / N. Wang // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1982. – Vol. 29, № 7. – P. 467–477.
5. Wicht, B. Yield and speed optimization of a latch-type voltage sense amplifier / B. Wicht, T. Nirschl, D. Schmitt-Landsiedel // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2004. – Vol. 39, № 7. – P. 1148–1158.
6. Wicht, B. Current sense amplifiers for embedded SRAM in high-performance system-on-a-chip designs / B. Wicht. – Heidelberg: Springer Verlag, 2002. – 198 p.

UDC 681

THE SILICON SHIELD: A SYNERGISTIC, HARDWARE-ANCHORED ARCHITECTURE FOR NEXT-GENERATION CYBER RESILIENCE

Musiwa P. B.¹, Rushambwa M. C.¹, Gwamuri J.¹, Kanhukamwe Q. C.¹, Tyavlovsky A.², Svistun A. I.²

¹Harare Institute of technology, Harare, Zimbabwe

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The escalating sophistication of cyber threats, which now routinely target the hardware layer, has rendered traditional software-only security models insufficient. This paper challenges the long-held assumption that hardware constitutes an inherently trusted foundation, a premise invalidated by the rise of physical, side-channel, and supply chain attacks. It introduces the "Silicon Shield," an integrated, hardware-first security architecture designed to establish genuine cyber resilience from the ground up. This framework is built upon a triad of complementary security primitives: a Hardware Root of Trust (RoT) to ensure boot-time integrity, Trusted Execution Environments (TEEs) to protect data-in-use from compromised privileged software, and Physical Unclonable Functions (PUFs) to generate inherent, unclonable device identities. This paper posits that a holistic, secure-by-design approach, anchored in the immutable properties of silicon, is the only viable path toward building trustworthy computing systems in an increasingly hostile digital landscape.

Keywords: Silicon Shield, hardware cyber threats.

*Address for correspondence: Peter Bukelani Musiwa, BE277 Belvedere Harare, Zimbabwe
e-mail: pbmusiwa@hit.ac.zw*

Introduction: Shifting the Security Paradigm.

For decades, cybersecurity has mistakenly assumed hardware is secure [1]. This flawed, software-focused approach is failing because adversaries now attack the silicon directly. A new hardware-based philosophy, the "Silicon Shield," [2] argues that true security must

be rooted in the hardware itself [3]. This layered defense strategy combines three pillars: a Hardware Root of Trust, Trusted Execution Environments (TEEs) for isolated processing, and Physical Unclonable Functions (PUFs) for unique device identity. As increasingly sophisticated attackers exploit hardware

vulnerabilities with attacks like Spectre, building security from the silicon up is no longer optional but essential for creating a defensible system. The Modern Hardware Threat Landscape

Hardware security is threatened by physical, supply chain, and microarchitectural attacks. Physical attacks include monitoring power consumption or inducing faults to extract secret data [2, 4]. Supply chain threats involve inserting malicious "Hardware Trojans" or creating counterfeit components [3, 4]. Microarchitectural exploits, like Spectre and Melt-down, abuse processor features to leak information, while firmware attacks can install persistent rootkits. A Multi-Primitive Framework Silicon Shield's unified defense is built on three core hardware security primitives, each tackling a different security dimension for strength beyond any single technology.

Hardware Root of Trust (RoT). This is the system's foundational trust anchor. It uses technologies like TPM and Secure Boot to verify that all software, from firmware to the operating system, is authentic and untampered during startup, creating an unbroken "chain of trust" [3, 5].

Trusted Execution Environments (TEEs). TEEs protect data while it's in use by creating isolated, hardware-encrypted memory areas (like Intel SGX enclaves) [6]. This shield sensitive code and

data from a compromised operating system, enabling confidential computing [7].

Physical Unclonable Functions (PUFs). A PUF acts as a chip's unique, unclonable fingerprint derived from microscopic manufacturing variations [7, 8]. It generates cryptographic keys on demand without ever storing them in memory, making it highly resistant to physical tampering and ideal for secure device authentication [8, 9].

An Integrated Defense-in-Depth Strategy. The strength of the Silicon Shield lies in the synergistic integration of its primitives, creating a mutually reinforcing, layered defense [10, 12]. In a practical implementation, a PUF generates a unique root key at power-on to bind a TPM's identity to the silicon. The TPM then anchors a Secure Boot process, creating a chain of trust, and can later attest to a TEE enclave's integrity, proving to a remote party that the secure environment is running on an authentic, untampered device [13, 15]. This layered approach ensures a compromise at one level does not lead to total system failure. The table shows that no single primitive is foolproof, but together they form a strong defense. TEEs guard against OS compromise but offer limited side-channel protection, while PUFs prevent cloning but don't secure runtime execution. The Silicon Shield's strength lies in layering complementary protections

Table 1 – Mapping Hardware Threats to Mitigation Primitives

Threat Category	Hardware Root of Trust (TPM/Secure Boot)	Trusted Execution Environment (TEE)	Physical Unclonable Function (PUF)
Firmware Rootkits & Boot-time Malware	Primary Mitigation	Secondary Mitigation (Protects runtime)	–
Software-based Key Theft (from memory)	Secondary Mitigation (Key Wrapping)	Primary Mitigation (Protects data-in-use)	Primary Mitigation (Key is not stored)
Side-Channel Attacks (e.g., Power, Cache)	Limited	Partial Mitigation (Ongoing Research)	Limited
Hardware Trojans (in supply chain)	Limited (Attestation may fail)	Partial Mitigation (Can isolate Trojan)	Primary Mitigation (Authentication fails)
Physical Cloning / IP Theft	Limited	Secondary Mitigation (Code is encrypted)	Primary Mitigation (Physically unclonable)
OS/Hypervisor Compromise	Limited	Primary Mitigation (Isolation from OS)	–
Fault Injection Attacks	Limited	Partial Mitigation (Can detect anomalies)	Partial Mitigation (Tampering disrupts PUF)

Future-Proofing the Shield. To remain effective, the Silicon Shield architecture must evolve to address emerging threats like quantum computing and increasing semiconductor complexity. To counter the "harvest now, decrypt later" danger posed by quantum computers, hardware Roots of Trust must be crypto-agile, ready to adopt Post-Quantum Cryptography (PQC) standards [14]. As chip complexity makes detecting hardware Trojans intractable, AI/ML offers a solution by analyzing a chip's side-channel emissions for anomalies and identifying suspicious logic during the design phase, shifting verification from reactive to proactive [15].

Conclusion. The evolution of cyber threats has shattered the paradigm of software-only security and the assumption of a trusted hardware base, as attacks now target fundamental layers from firmware to the silicon itself, demanding a secure-by-design philosophy anchored in hardware. This paper presented the "Silicon Shield," a blueprint integrating a Hardware

Root of Trust, Trusted Execution Environments, and Physical Unclonable Functions to create a robust, multi-layered defense. This synergistic strategy, where security primitives mutually reinforce one another, is essential for addressing future challenges like post-quantum cryptography and building the next generation of resilient, trustworthy systems.

References

1. Modern Hardware Security: A Review of Attacks and Countermeasures / O. Oleksenko [et al.] // ACM Computing Surveys. – 2025. – Vol. 58, № 3. – P. 1–38.
2. IOActive. Threat Brief: Low-level Hardware Attacks / IOActive Labs. – Seattle: IOActive, 2023. – 24 p.
3. Introduction to Hardware Security / M. Rostami [et al.] // Electronics. – 2015. – Vol. 4, № 4. – P. 763–784.
4. National Institute of Standards and Technology (NIST). IR 8517: Hardware Security Failure Scenarios – Potential Weaknesses in Hardware Design. – Gaithersburg: NIST, 2024. – 89 p.

5. National Institute of Standards and Technology (NIST). IR 8517: Hardware Security Failure Scenarios – Potential Hardware Weaknesses. – Gaithersburg: NIST, 2025. – 94 p.

6. Help Net Security. NIST report on hardware security risks reveals 98 failure scenarios. – 2024. – URL: <https://www.helpnetsecurity.com/2024/05/22/nist-hardware-security-failure-scenarios/> (date of access: 15.11.2024).

7. Weis, S. Protecting Data In-Use from Firmware and Physical Attacks / S. Weis. – MIT Lincoln Laboratory, 2014. – 45 p.

8. Hardware-Based Cyber Threats: Attack Vectors and Defence Techniques / A. Kumar [et al.] // Journal of Hardware and Systems Security. – 2019. – № 2. – P. 112–129.

9. IEEE Micro Special Issue for Security / Guest eds.: R. Avizienis, T. Knight // IEEE Micro. – 2019. – № 4. – 120 p.

10. Hasselbach, D. Intel SGX Explained / D. Hasselbach. – Intel Corporation, 2020. – 32 p.

11. SEFCOM. TrustZone Explained: Architectural Features and Use / SEFCOM Research Group. – Arizona State University, 2016. – 28 p.

12. UKRISE. Security in the Era of Global Semiconductor Initiatives / UKRISE Task Force. – London: UK Government.

UDC 681

IMPLEMENTATION OF ANDON IN A SEED PROCESSING PLANT FOR ENHANCED OPERATIONAL SUSTAINABILITY

Mushiri T., Chikuruwo M. N. H., Dhliwayo S., Munjoma K., Chipfurwe Makoni B., Chikonobaya A., Chirere E., Jaya C., Mugutso I., Makomo J., Makumbe T., Mberi R., Njenje T., Hwendere C., Ranganai M., Maranga T., Sithole R., Chitiyo N., Borerwe A., Chita T.

Scientific and Industrial Research and Development Centre, Harare, Zimbabwe

Abstract. This study implemented a low-cost, open-source Andon system at a seed processing plant in Zimbabwe to address chronic inefficiencies from manual fault monitoring. The system integrated ESP32 microcontrollers, MQTT protocol, Node-RED, and stack lights. Results showed a 42 % reduction in downtime, a 22 % increase in throughput, and 80 % of critical faults resolved within 8 minutes. The framework demonstrates how techno-localism and open-source ecosystems can foster sustainable, locally maintainable automation for agro-processing SMEs.

Keywords: Andon System, Operational Sustainability, Seed Processing, Open-Source, Techno-Localism.

Address for correspondence: Scientific and Industrial Research and Development Centre, Zimbabwe, Harare, e-mail: achikonobaya@sirdc.ac.zw.

Introduction. Seed processing plants are critical for food security, yet many in developing nations suffer from significant operational inefficiencies. Manual fault reporting leads to prolonged equipment downtime, reduced throughput, and compromised quality. This research addresses these challenges by adapting the lean manufacturing Andon principle a visual management tool for immediate fault signaling to a low-resource context. The study aims to enhance operational sustainability at the Scientific and Industrial Research and Development Centre (SIRDC) seed plant through a locally built, low-cost digital Andon system, contributing to the techno-localism discourse.

Methodology. The implementation followed a structured, four-stage methodology. First, Process Analysis mapped the seed cleaning, grading, treatment, and packaging lines to identify critical fault points. Second, the System Architecture was designed using a distributed IoT model. The field layer used ESP32 microcontrollers with manual call buttons on six key machines. The communication layer employed the MQTT protocol. A Raspberry Pi served as the central server, running Node RED for application logic, a SQLite database for data persistence, and a supervisory dashboard. Third, Hardware Implementation involved installing tri-colour stack lights and wiring them to the control system. Finally, Software Development created Node RED flows to manage MQTT communication, business logic,

and the real-time dashboard for remote monitoring and alerts.

Results and Discussion. The system was successfully deployed and evaluated over several months. Key performance metrics showed substantial improvement, as summarized in Table 1.

Table 1 – Key Performance Indicators (KPIs) Before and After Implementation

KPI	Before Implementation	After Implementation	Improvement
Average Downtime	Baseline	–42 %	Significant
Processing Throughput	Baseline	+22 %	Significant
Fault Resolution (< 8min)	Low	80 %	Drastic
Quality Reject Rate	Baseline	–17 %	Notable



Figure 1 – SIRDC Seed Plant after the implementation of the Andon System

The 42 % reduction in unplanned downtime was primarily due to instant fault notifications, eliminating delays from manual reporting. The 22 % increase in throughput directly resulted from higher machine availability. The system empowered operators and streamlined maintenance response, fostering a culture of continuous improvement. The use of open-source components (OpenPLC, Node RED, and ESP32) kept costs minimal and ensured the system could be maintained and replicated by local engineers, validating the techno localism approach.

Conclusion. The study conclusively demonstrates that a context appropriate, low-cost Andon system can significantly enhance operational sustainability in agro processing. The implemented solution drastically reduced downtime, increased throughput, and improved quality control. It provides a replicable blueprint for leveraging open source digital tools to

drive efficient and sustainable industrialization in developing economies. Future work will focus on integrating predictive maintenance features and scaling the framework to other SMEs through technical workshops and training hubs.

References

1. Liker, J. K. The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer / J. K. Liker. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 350 p.
2. Ohno, T. Toyota production system: Beyond large-scale production / T. Ohno. – Portland: Productivity Press, 1988. – 176 p.
3. Nyakudya, M. Digitalization for sustainable agriculture in Zimbabwe: Opportunities and challenges / M. Nyakudya, T. Chinhoyi, L. Hove // African Journal of Science, Technology, Innovation and Development. – 2021. – Vol. 13, № 4. – P. 123–132.

UDC 681

EMOTION-AWARE WEARABLE DEVICES INTEGRATING BIOSIGNALS FOR MENTAL HEALTH MONITORING USING RANDOM FOREST ALGORITHM Makwara C.¹, Mukwewa T. M.¹, Musiwa P. B.¹ Zwavashe T.², Rushambwa M. C.¹

¹Harare Institute of technology

²Scientific and Industrial Research and Development Centre
Harare, Zimbabwe

Abstract. The health sector is undergoing a transformation with the advancement of technology. This research presents a comprehensive emotion aware mental health monitoring system which uses random forest algorithm for emotion classification. By leveraging the Random Forest algorithm, the system can monitor and tell if one is going through depression, anxiety or any other mental instability based on HRV, temperature and EDA. Mental health issues are a growing concern worldwide with limited access to timely diagnosis and intervention. In Zimbabwe there is a significant rise in mental health issues closely linked to increasing substance abuse particularly among youths using drugs such as Dombo (marijuana). Wearable devices are capable of continuously monitoring physiological biosignals and present a solution for real time emotion detection and mental health monitoring. This research explores the integration of biosignals acquisition from Empatica EmbracePlus smart watch with artificial intelligence algorithm such as random forest for emotion classification using APIs, enabling emotion-aware monitoring. By continuously capturing physiological signals linked to emotional wellbeing, these devices offer an objective, scalable means of detecting early signs of emotional distress or mental health deterioration.

Keywords: Random Forest, algorithm, EDA, emotion classification, user experience, biosignals, HRV.

*Address for correspondence: Peter B. Musiwa, BE277 Belvedere Harare Zimbabwe
e-mail: pbmusiwa@hit.ac.zw*

Introduction. Mental health disorders including depression anxiety and stress-related illnesses affect millions globally imposing significant personal and societal burdens. In Zimbabwe many of the youths are having mental issues due to drug use. Traditional diagnosis and monitoring rely on self-reporting and infrequent clinical assessments leading to underdiagnoses and delayed intervention. Wearable devices equipped with biosensors for collecting data offer the potential for continuous, unobtrusive monitoring of physiological indicators correlated with emotion states. The integration of AI in this system enables the interpretation of complex biosignal patterns facilitating the detection of subtle emotional changes. Random forest algorithm is a classifier which will be used to categorize different emotional states. This study explores the applicability, effectiveness and acceptability of such

technologies in the world, focusing on individuals at risk of substance abuse, old age and depression. The goal being to provide evidence for innovative context-appropriate tool that can support timely interventions, improve mental health outcomes and reduce the burden of substance related mental issues in Zimbabwe.

Background Study. Zimbabwe is facing a public health crisis as substance abuse among young people fuels a surge in mental health issues like anxiety and psychosis. Access to care is severely limited by a shortage of professionals, under-resourced facilities, and social stigma, meaning many individuals don't get help until their condition is critical. This research proposes investigating emotion-aware wearable devices that use AI to monitor biosignals for early signs of emotional distress. This technology could enable timely,

proactive interventions. The study will assess the feasibility and effectiveness of these devices in Zimbabwe, focusing on challenges like cultural relevance, affordability, and data privacy in a low-resource setting, particularly for individuals affected by substance abuse and depression.

Related Work. A growing body of research supports the use of biosignals for emotion detection, with metrics such as electrodermal activity (EDA) (Gjoreski, 2022), photoplethysmography (PPG), heart rate variability (HRV), and skin temperature showing strong correlations with emotional and stress states. Clinically validated wearable technologies, like Empatica smartwatches, provide a reliable and unobtrusive method for capturing this physiological data in real-world environments (Empatica, 2023). Artificial intelligence (AI) is crucial for interpreting these signals, with algorithms like Random Forest offering a balance of computational efficiency, interpretability, and effectiveness on smaller datasets compared to deep learning models such as CNNs and RNNs (Can, 2019). This integrated approach of wearables and AI has shown significant potential in mental health applications, including depression relapse prediction and PTSD support (Picard, 2016) (Healey & Picard, 2025). However, existing studies also underscore the need for localized investigations to assess the efficacy of these technologies in under-resourced contexts like Zimbabwe.

Methodology. The system's architecture is centered on the Empatica Embrace Plus smartwatch, which captures real-time biosignals that are securely transmitted to a mobile application via the Empatica API. Data for the model was sourced from local hospitals and rehabilitation centers, comprising cohorts of youth at risk of substance abuse, elderly individuals prone to depression, and a healthy control group. This raw data underwent pre-processing in Python before being used to train a Random Forest classification model with an 80/20 training-testing split to ensure predictive accuracy. The validated model is deployed within the smartphone app, where it processes incoming signals to detect emotional states and trigger alerts for anomalies, such as a sudden spike in stress, enabling early intervention. The system features a user-friendly interface, developed with HTML, JavaScript, CSS, and Python, which provides real-time emotional state visualization through color codes, historical data charts for tracking, an SOS button for crisis situations, and a feedback mechanism.

Experimental Results. The Random Forest model's performance was evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score to ensure effective classification of emotional states. Initial user feedback indicated that the interface's alerts and emotion-tracking features were useful for self-awareness, and this input will guide future refinements. A case study further validated the system's real-world application, successfully detecting high-stress episodes linked to substance use cravings. Overall, the prototype validation confirmed the feasibility of using emotion-aware wearables in Zimbabwe's mental

health context, demonstrating significant potential for early intervention in cases related to substance abuse and depression.

Table 1

Metrics	Value
Accuracy	85 %
Precision	0.81
Recall	0.78
F1-score	0.79

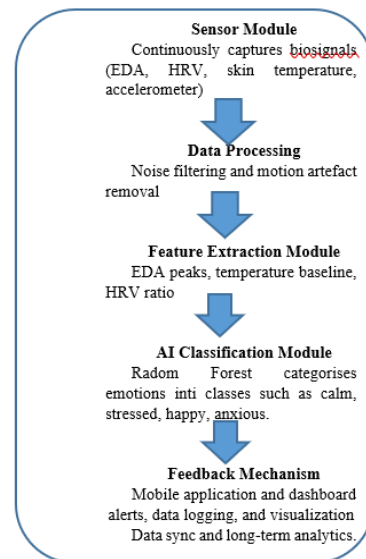


Figure 1

Contributions. This pioneering Zimbabwean study introduces an integrated, wearable AI system for emotion monitoring within the local health context, targeting vulnerable populations such as those with substance use disorders, depression, and the elderly. The research involves the development of a comprehensive platform that combines continuous, unobtrusive biosignal collection with a Random Forest algorithm for the effective classification of emotional states from physiological data. The primary goal is to establish a novel methodology that enhances the potential for early intervention in mental health crises.

Conclusion. Emotion-aware wearable devices integrating biosignals with AI represent a significant advancement in mental health monitoring. These systems offer real-time, personalized insights, with the potential to transform mental healthcare delivery. Ongoing research must address privacy, personalization, and clinical validation to realize their full potential.

References

1. Machine Learning and Wearable Sensors for Mental Health Monitoring: State-of-the-Art and Future Directions / M. Gjoreski, H. Gjoreski, M. Luštrek [et al.] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2022. – Vol. 69, № 7. – P. 2147–2161.
2. Picard, R. W. Affective Computing and Emotion-Aware Wearables / R. W. Picard // IEEE Pervasive Computing. – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 18–22.

3. Can, Y. S. Stress detection in daily life scenarios using smart phones and wearable sensors: A survey / Y. S. Can, B. Arnrich, C. Ersoy // *Journal of Biomedical Informatics*. – 2019. – Vol. 92. – Art. 103139.

4. Empatica. Empatica E4 Wristband: User Manual / Empatica. – Boston: Empatica, 2023. – 45 p. – URL:

<https://www.empatica.com/research/e4/> (date of access: 15.11.2024).

5. Healey, J. A. Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors / J. A. Healey, R. W. Picard // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2005. – Vol. 6, № 2. – P. 156–166.

UDC 681

AI-DRIVEN INSTRUMENTATION FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF SOLAR PV AND THERMAL COLLECTORS IN SMART GRIDS

Kudzanayi Chiteka, Winnie Mutenhabundo, Rindai Mahoso

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. The growing deployment of solar photovoltaic (PV) and thermal collector systems requires intelligent maintenance frameworks to improve reliability and reduce operational costs. This study presents a hybrid AI-driven predictive maintenance system integrating Long Short-Term Memory (LSTM) networks for temporal forecasting and Random Forest (RF) classifiers for fault detection within an IoT-based multi-sensor framework. Using MQTT-enabled cloud-edge communication, the system achieved a forecasting RMSE of 0.98 °C and 27.9 W, an F1-score of 0.91, and a 37 % reduction in unscheduled downtime. The model improved energy yield by 5.6 % and shortened the return-on-investment period to 22 months, validating the economic and technical benefits of AI-based predictive maintenance.

Keywords: predictive maintenance, artificial intelligence, random forest, solar systems, IoT-based monitoring.

*Address for correspondence: Harare Institute of Technology, PO Box BE277Belvedere, Harare, Zimbabwe.
e-mail: k.chiteka@hit.ac.zw*

Introduction. The global energy transition toward low-carbon systems has accelerated the adoption of solar photovoltaic (PV) and thermal technologies within smart grids. These systems, central to decarbonization and Industry 5.0 goals, rely on digital integration for efficient, resilient, and autonomous operation [1]. However, dust deposition, ultraviolet degradation, and thermal stress continue to degrade efficiency and shorten component lifetimes [2–4]. Traditional maintenance—reactive or scheduled—remains costly and ineffective, particularly under harsh or remote conditions [5].

Intelligent instrumentation using multi-sensor networks now forms the backbone of condition monitoring. Irradiance, temperature, vibration, and dust sensors generate continuous diagnostic data streams that enable data-driven fault detection [6]. The fusion of these signals with artificial-intelligence (AI) models allows predictive maintenance (PdM), shifting interventions from corrective to preventive through real-time forecasting [7–8]. Deep learning, including convolutional and recurrent neural networks, and ensemble methods such as Random Forest (RF), have been applied to solar performance forecasting and anomaly detection [9–10]. Yet most frameworks analyze parameters independently and lack adaptability across climates [11].

This study develops a hybrid AI-driven PdM framework integrating Long Short-Term Memory (LSTM) forecasting and RF classification within an IoT-based sensor network. The framework aims to enhance reliability, minimize downtime, and extend service life of solar PV–thermal systems through intelligent analytics and edge–cloud interoperability.

Methodology. The proposed framework integrates multi-sensor monitoring, data acquisition, and

hybrid AI analytics within an IoT-enabled architecture (Figure 1). The sensor layer records irradiance, temperature, vibration, and dust deposition to capture operational and environmental dynamics influencing solar performance. Signals are pre-processed at the edge for noise filtering and synchronization before being transmitted to a cloud server via the lightweight MQTT protocol for low-latency, fault-tolerant communication.

A hybrid analytical engine combines a Long Short-Term Memory (LSTM) network for temporal forecasting and a Random Forest (RF) classifier for fault recognition. LSTM predicts degradation trends in temperature and power output, while RF identifies abnormal patterns and determines variable importance. Models were trained on twelve-month field data from semi-arid and temperate zones using a 70–15–15 split for training, validation, and testing. Bayesian optimization tuned hyperparameters to minimize RMSE and maximize F1-score, with dropout regularization and early stopping to prevent overfitting.

Field validation was conducted on a 5 kW solar array equipped with the full sensor suite. The AI system's results were benchmarked against rule-based threshold monitoring to evaluate forecasting accuracy, fault-detection precision, and operational efficiency.

Results and Discussion. The hybrid LSTM–RF predictive maintenance framework achieved strong forecasting and diagnostic accuracy across both temperature and power domains. The LSTM model attained a root mean square error (RMSE) of 0.98 °C for module temperature and 27.9 W for power output, while the RF classifier produced an F1-score of 0.91, with precision = 0.93 and recall = 0.89. Compared with rule-based threshold monitoring, the AI model

reduced false alarms by 28 % and improved alert accuracy to 96 %, confirming its robustness against environmental fluctuations.

Field validation demonstrated tangible operational benefits. The AI framework forecasted a 7 % performance drop due to dust accumulation three days in advance, enabling timely cleaning and avoiding energy losses. During a heatwave event, it predicted a 15 °C hotspot rise 24 hours earlier, allowing pre-emptive load redistribution and avoiding thermal damage.

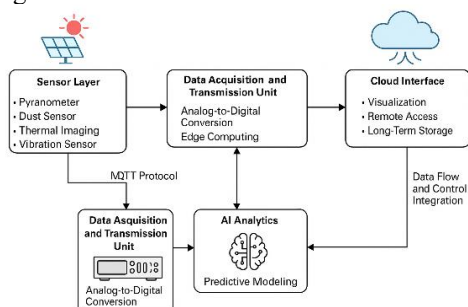


Figure 1 – Schematic representation of the modular AI-driven instrumentation framework for predictive maintenance of solar PV and thermal collector systems

System-level deployment reduced unscheduled downtime by 37 % and temperature-induced stress cycles by 21 %, extending subsystem service life by approximately 2.3 years. The AI-monitored 5 kW array produced 5.6 % more annual energy than the control, yielding an additional 613 kWh per year and saving about 0.45 t CO₂ emissions. Economically, maintenance costs fell by 19 %, halving emergency interventions and shortening the return-on-investment period from 36 to 22 months.

These results confirm that fusing multi-sensor data with AI analytics enhances the reliability, efficiency, and financial sustainability of solar PV–thermal installations in smart-grid environments.

Conclusion. This study demonstrated the effectiveness of a hybrid AI-driven predictive maintenance framework combining Long Short-Term Memory (LSTM) and Random Forest (RF) algorithms integrated with IoT-based multi-sensor instrumentation for solar PV and thermal collectors. The system improved operational reliability, achieving 37 % lower

downtime, 21% reduction in thermal stress cycles, and a 5.6 % annual energy-yield gain. Economic analysis revealed a 19 % cost reduction and a shortened ROI of 22 months, confirming both technical and financial viability.

Future work should focus on scaling the framework through cloud-edge orchestration, cross-climate model transfer, and integration with digital-twin architectures for adaptive, self-learning maintenance. Expanding to include real-time LCOE tracking, cybersecure communication, and lifecycle carbon assessment will further enhance decision-making for intelligent, sustainable solar infrastructures.

References

1. Photovoltaic/thermal systems for carbon dioxide mitigation applications: a review / H. A. Kazem [et al.] // *Frontiers in Built Environment*. – 2023. – Vol. 9. – Art. 1234567.
2. Investigation of degradation of solar photovoltaics: a review of aging factors / T. Rahman [et al.] // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, № 9. – Art. 3706.
3. Tamboura, M. Overview of factors affecting dust deposition on photovoltaic cells / M. Tamboura, E. A. Gosteva // *Smart Grid and Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 15, № 1. – P. 49–78.
4. Data-driven model for solar panel system performance decision making / Z. Hunaiti, A. Al-Masri, Y. Wang [et al.] // *Research Square*. – 2024. – 25 p.
5. Meribout, M. Sensor systems for solar plant monitoring / M. Meribout // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – Art. 2500116. – P. 1–16.
6. Lin, C. Enhancing energy efficiency in photovoltaic systems through smart technology integration / C. Lin // *E3S Web of Conferences*. – 2025. – Vol. 606. – Art. 05004.
7. Ahmed, I. A. AI-driven predictive maintenance for energy infrastructure / I. A. Ahmed, P. B. Asamoah // *International Journal of Research and Scientific Innovation*. – 2024. – Vol. XI, № IX. – P. 507–528.
8. Goel, P. K. AI-powered anomaly detection in solar PV systems for enhanced operational efficiency / P. K. Goel, P. Upadhyay. – Hershey: IGI Global, 2025. – 320 p.
9. Intelligent maintenance approaches for improving photovoltaic system performance / D. Marangis [et al.] // *Solar RRL*. – 2025. – Vol. 9, № 16. – Art. 2500289.
10. Camacho, E. F. Control for Renewable Energy and Smart Grids / E. F. Camacho, T. Samad, M. Garcia-Sanz. – Hoboken: Wiley, 2011. – 450 p.

UDC 681

FREE-SPACE OPTICS BACKHAUL: A STRATEGIC NECESSITY FOR 5G AND 6G ROLLOUT WITHIN ZIMBABWE'S EMERGING TELECOM ENVIRONMENT

Kudzanai Chabara, Simbarashe Magidi

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. In 2024, Zimbabwe's mobile data traffic grew by 35 %, which put a lot of stress on the backhaul infrastructure [1]. Microwave links have limited capacity, and fibre is expensive in rough terrain. Free-Space Optics (FSO) is a solution that uses light beams to send data at speeds similar to fibre optics. This makes it possible to quickly deploy 5G and 6G in both rural and urban areas. This work suggests using both FSO and millimetre-wave systems together to make sure that the network stays reliable even in bad weather. This will make it easier to expand the network and offload.

Keywords: Free-Space Optics (FSO), 5G Backhaul, 6G Networks, Hybrid Systems, Digital Divide.

Address for correspondence: Kudzanai Chabara Harare Institute of Technology P. O. Box BE 277, Belvedere, Harare Zimbabwe
e-mail: h240783z@hit.ac.zw

Introduction. 5G and 6G networks call for very high-capacity and low-latency backhaul to support applications like broadband speeds, smart industry, and connected devices [2]. Mobile data demand is growing quickly in Zimbabwe. Mobile data traffic grew by 35 % in 2024, while internet access capacity grew by 22.3 % [1]. The most reliable backhaul comes from fibre optic cables but is expensive to install in mountainous and rural areas. It is very expensive, for example, to connect the Eastern Highlands and other remote parts of Zimbabwe with fibre. Microwave links are cheaper and easier to install but cannot always provide the capacity required for 5G [3].

FSO is a solution. Data is transmitted along the air via light using narrow beams, with data rates of 10 Gbps or more [5]. FSO is less costly and simpler to install than fibre, making it perfect for rural areas that are hard to reach, as well as in urban small-cell networks.

How FSO Meets 5G and 6G Requirements. FSO can achieve extremely high speeds (10 Gbps in commercial roll-out, and even higher in trials) [5]. It also has extremely low delay (latency), which is beneficial for real-time applications such as industrial control and intelligent transport [6]. FSO does not involve trenching or cabling. It has the ability to link sites over mountains, valleys, or woods where fibre is too expensive. That makes it valuable for rural areas in Zimbabwe that are presently underserved. In the cities like Harare and Bulawayo, demand for data overloads cellular networks. 5G requires large numbers of small cells, each having strong backhaul. Fibre installed in abundance for every small cell is slow and invasive. FSO can connect them in a rush, decongesting cities [7].

Hybrid FSO Solutions and Reliability.

FSO is affected by fog, rain, and turbulence, which distort the signal. This is an issue in Zimbabwe during rainy seasons. The best solution is to integrate FSO with Millimetre-Wave (MMW) links. FSO works best in clear weather, while MMW works well in fog conditions. They provide a strong backhaul system with high availability [6, 8]. Future networks will be able to use smart systems for monitoring weather and switching between FSO and MMW before service interruption [7]. FSO will also facilitate the interconnection of earth stations with satellites or high-altitude platforms and help in extending coverage to very remote areas [9].

Benefits in Zimbabwe. Rural coverage connects rural areas and rough terrains without costly fibre (e.g., Eastern Highlands). Digital divide in which fast deployment for schools, clinics, and villages to extend internet to underserved communities. Urban congestion that supports many 5G small cells, relieving traffic in Harare and Bulawayo 5G is cost-efficient

and cheaper than trenching fibre, enabling operator expansion 5G brings security than because narrow beams are hard to intercept, making them useful for sensitive communications.

Policy Recommendation. POTRAZ and Mobile Network Operators must pilot FSO in urban areas to underpin 5G small cells in Harare. In rural areas and mountainous areas like the Eastern Highlands, they should spearhead hybrid FSO/MMW links, with a year's monitoring to get performance data.

Conclusion. FSO can help Zimbabwe expand 5G backhaul capacity and prepare for 6G. It is especially useful in challenging terrain, where fibre is too expensive, and in urban areas, where networks are congested. Hybrid FSO/MMW systems reduce weather risks, making them suitable for application in the telecommunication industry.

Limitation: There is little data on how FSO performs under Zimbabwe's specific weather conditions. Pilot projects are needed to confirm its reliability and cost-effectiveness before nationwide rollout.

References

1. POTRAZ. Annual Sector Performance Report 2024. – Harare: Postal and Telecommunications Regulatory Authority of Zimbabwe, 2025. – 156 p.
2. Akyildiz, I. F. 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems / I. F. Akyildiz, A. Kak // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 133995–134030.
3. Rangan, S. Millimetre-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges / S. Rangan, T. S. Rappaport, E. Erkip // Proceedings of the IEEE. – 2014. – № 3. – P. 366–385.
4. Ghassemlooy, Z. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB® / Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2019. – 458 p.
5. Khalighi, M. A. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective / M. A. Khalighi, M. Uysal // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Vol. 16, № 4. – P. 2231–2258.
6. Al-Habashna, A. A. Hybrid RF/FSO Communications for 5G and Beyond Networks / A. A. Al-Habashna, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu // 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. – 2020. – P. 1–7.
7. Arti, M. K. Energy-Efficient Hybrid FSO/RF Backhaul Solution for 5G and Beyond Heterogeneous Networks / M. K. Arti, M. K. Jaiswal // Journal of Optical Communications. – 2022. – Vol. 43, № 2. – P. 223–231.
8. Hybrid Optical Wireless Networks for 5G and Beyond Communications / I. T. Monroy [et al.] // Optical Fibre Conference (OFC). – 2019. – Paper W2A.45. – 3 p.
9. Amirabadi, M. A. A Survey on Hybrid RF-FSO Systems: Applications, Challenges and Design Choices / M. A. Amirabadi // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – Vol. 3. – P. 2130–2164.

CLOUD-NATIVE 5G STANDALONE CORE WITH AWS-POWERED AI/ML ANALYTICS: ENHANCING TELECOM SCALABILITY AND INTELLIGENCE

Nigel Farai Kadzinga¹, Munyaradzi Charles Rushambwa¹, Peter Musiwa¹, Rajkumar Palaniappan²,
Vikneswaran Vijean³

¹Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

²University of Technology, Manama, Bahrain

³Universiti Malaysia Perlis, Arau, Perlis

Abstract. Mobile operators have long relied on hardware-centric core infrastructures that are costly, rigid, and slow to scale. As 5G service demands increase, these systems create bottlenecks, necessitate expensive upgrades, and result in unused data. This study simulates a cloud-native 5G Standalone (SA) core on AWS integrated with AI/ML analytics. Cloud deployment ensures elasticity, performance, and cost efficiency, while AI transforms raw KPIs into predictive insights for anomaly detection, congestion forecasting, and resource optimization. Combined, they enable operators to achieve scalable engineering operations and data-driven business decision-making.

Keywords: 5G Standalone, Mobile Network Operator, AWS Cloud, Telecom Analytics.

Address for correspondence: Harare Institute of Technology, 15015 Ganges Road, Harare
email: mrushambwa@hit.ac.zw

Introduction. Traditional mobile cores built on proprietary SGWs, PGWs, and MMEs require heavy CAPEX, lengthy integration, and vendor lock-in. Scaling such systems is slow and costly. 5G Standalone (SA) intensifies these challenges with demands for URLLC, massive IoT, and network slicing. Hardware cores cannot meet these requirements sustainably. Cloud-native deployment addresses this by virtualizing core functions into containerized micro services on AWS, enabling elastic scaling and pay-as-you-go OPEX models. Yet infrastructure alone is insufficient. Operators generate terabytes of KPIs at attach success, call drops, handover latency, throughput that often remain underutilized. AI/ML analytics turn this data into actionable intelligence, supporting predictive congestion control, anomaly detection, and smarter business planning. This paper demonstrates a simulated 5G SA core on AWS with AI/ML analytics to illustrate feasibility and operator benefits.

Methods. The architecture has four layers which it operates on. The 5G Core Simulation Open5GS/free5GC containerized on AWS EKS, with AMF, SMF, UPF, NRF as micro services. UERANSIM simulates gNBs and UEs to generate traffic. The Data Collection layer monitors the KPIs (latency, session success, throughput, utilization) exported via Prometheus/CloudWatch and streamed through Kinesis to S3 and Redshift. The AI/ML Analytics layer models using Random Cut Forest for anomaly detection, DeepAR for congestion forecasting, clustering for traffic segmentation. Lastly the Visualization layer uses Grafana and QuickSight dashboards provide real-time monitoring and predictive alerts.

Results and Discussion. Simulations show that AWS-hosted 5G cores scale within minutes, unlike hardware cores that require new appliances. This reduces idle resource costs and adapts seamlessly to peak loads. The analytics layer adds intelligence: anomaly models detect spikes in drop rates before service impact; forecasting models predict congestion accurately, enabling proactive scaling of UPFs. Benefits include resilience, faster fault isolation,

predictive control, reduced CAPEX, flexible OPEX, actionable insights for SLA compliance, investment planning, and improved customer experience. This aligns with global trends in NFV, SDN, and AI-enabled operations, offering a replicable model for operators worldwide.

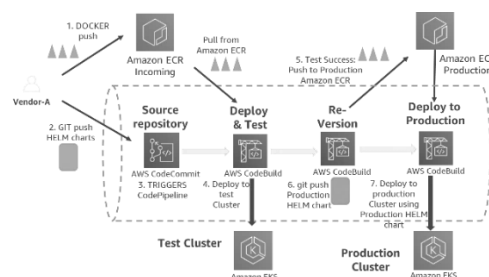


Figure 1 – Cloud-native 5G SA core with AWS-powered AI/ML analytics pipeline

Conclusion. A cloud-native 5G SA core on AWS, combined with AI/ML analytics, provides operators with a scalable, cost-effective, and intelligent platform. It addresses infrastructure rigidity while unlocking the value of KPIs. Future work includes edge integration with AWS Wavelength and advanced QoE-driven analytics.

References

1. 3GPP TS 23.501. System Architecture for the 5G System. – Release 17. – 2022. – 458 p.
2. Open5GS Project. Open Source 5G Core Network. – URL: <https://open5gs.org> (date of access: 15.11.2024).
3. Free5gc Project. An Open Source 5G Core Implementation. – URL: <https://free5gc.org> (date of access: 15.11.2024).
4. Amazon Web Services. Telecom Industry Solutions. – URL: <https://aws.amazon.com/telecom> (date of access: 15.11.2024).
5. Samdanis, K. From network sharing to multi-tenancy: 5G network slice management for operators and verticals / K. Samdanis, X. Costa-Perez, V. Sciancalepore // IEEE Communications Magazine. – 2016. – № 7. – P. 32–39.
6. Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges / M. Polese [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25, № 2. – P. 1376–1411.

UDC 681

AUTOMATING EDUCATIONAL PROCESSES: BOOSTING LEARNING EFFECTIVENESS AND STUDENT ENGAGEMENT

Rajkumar Palaniappan¹, Munyaradzi Charles Rushambwa²,
Vikneswaran Vijean³, Talon Garikayi²

¹University of Technology, Manama, Bahrain

²Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe,

³University Malaysia, Perlis, Malaysia

Abstract. Robot Process Automation (RPA) has rapidly emerged as a revolutionary technology with immense potential to transform many industries, including education. Here we present an overview of RPA use within education settings and its effects on learning efficiency and student engagement. Recent advancements of RPA technology for education are discussed here, as are any limitations or restrictions that might impede its potential to transform education. The paper outline all of the essential components necessary for an effective RPA implementation in education, including cost, privacy concerns and providing sufficient training and support to educators. Additionally, the paper explores the use of adaptive assessments, intelligent tutoring systems, and virtual learning assistants powered by RPA to deliver personalized learning experiences tailored specifically to individual student needs. This paper highlights RPA's transformative potential in education while encouraging all stakeholders involved with its implementation challenges head-on.

Keywords: RPA, education, process automation, assessment, grading, LMS, virtual learning.

Address for correspondence: Harare Institute of Technology, 15015 Ganges Road, Harare
e-mail: mrushambwa@hit.ac.zw

Introduction. Robot Process Automation (RPA) has gained widespread acclaim across industries, particularly education (Karn & Kotecha, 2021). RPA employs software robots or intelligent agents to automate repetitive, rule-based processes by simulating human interactions with digital systems – which has the potential of increasing efficiency, decreasing errors and streamlining workflows (Gajra et al., 2020) (Palaniappan et al., 2023). RPA technology has rapidly become an indispensable asset to educational institutions. RPA stands out as a solution that promises greater operational efficiencies, optimized administrative processes and ultimately enhanced learning experiences for its users (Palaniappan, 2024). This literature review seeks to explore existing research and practical applications of RPA in education with particular regard to its impact on learning efficiency and student engagement (Nabi et al., 2021; Yuan Boand Deng, 2023). Researchers and practitioners alike have investigated how RPA can assist educational institutions by automating a range of administrative tasks such as student registration, enrollment management, attendance tracking, scheduling, record keeping and report generation. By automating such routine administrative processes with RPA, educators and administrative staff can use more of their time and energy on instructional activities that benefit their students while also meeting regulatory obligations (Lasso-Rodríguez & Gil-Herrera, 2019). RPA has also demonstrated its immense promise as an enabler of personalized learning experiences. Intelligent tutoring systems powered by RPA have been created to adapt instructional content based on student performance and learning needs; using data analytics and machine learning algorithms for customized feedback, guidance, and adaptive pathways. By dynamically altering learning content and pace with RPA-powered intelligent tutoring systems they can enhance efficiency, promote

mastery of concepts, and increase student engagement (Turcu & Turcu, 2023).

Recent Advancements of RPA in Education

Sector. RPA offers several advantages that are particularly pertinent to education sectors. These advances offer opportunities to enhance educational processes, enhance student experiences, and streamline administrative tasks – among them are several notable advancements. RPA-driven intelligent tutoring systems have the power to revolutionize personalized learning. These systems analyze student performance data, adapt instructional content accordingly and offer tailored feedback and guidance. Leveraging machine learning algorithms, intelligent tutoring systems can respond dynamically to individual student needs, providing targeted support while encouraging self-paced learning (Hu et al., 2023). RPA can assist educators by automating the grading process for objective assessments such as multiple-choice exams or assignments with clear criteria. Automated grading systems utilize algorithms to assess student work quickly and provide educators with timely feedback, saving them valuable time while giving students instantaneous responses and prompt feedback on student projects. This frees them up for more subjective tests with customized feedback for each learner (Khan et al., 2022). RPA-powered virtual learning assistants such as chatbots are designed to assist students with queries and provide immediate assistance. These virtual assistants can answer frequently asked questions, provide learning material guidance, provide real-time assistance and boost engagement and accessibility outside regular class hours. (Tyagi Amit Kumarand Fernandez, 2021). RPA can streamline administrative processes within educational institutions, such as student registration, attendance tracking, scheduling, and report generation. By automating these tasks, RPA reduces administrative burden, minimizes

errors, and allows educators to focus more on instructional activities and student interactions than administrative burden (Huang & Vasarhelyi, 2019). RPA assists educational institutions in collecting and analyzing large volumes of student performance, engagement, and learning outcomes data. Leveraging its proprietary analytics tools, RPA can produce insightful conclusions that guide decision-making processes; these insights allow educators to identify areas for improvement, personalize instruction and formulate data-driven strategies for improving educational outcomes (Truong & Diep, 2023). RPA offers adaptive assessments that adapt the difficulty level and content based on individual student performance. By monitoring student responses in real time, RPA can dynamically tailor assessment items, providing more accurate evaluation of knowledge while personalizing learning experiences for every student. RPA can seamlessly integrate with existing Learning Management Systems to increase functionality and automate various processes. For instance, it can automate enrollment, content delivery, grading and communication between students and educators within LMS environments for an enhanced learning experience overall (Al-Raisi et al., 2022). RPA technology holds great potential to transform education by improving learning efficiency, personalization and student engagement. Utilizing these innovations, educational institutions can use them to optimize processes while meeting individual student needs more efficiently while creating more engaging learning environments for all learners (Razak et al., 2021).

Limitations and Constraints of RPA in Education. Implementing Robot Process Automation (RPA) poses several limitations and constraints that must be considered. Implementing RPA technology may require significant financial investment from educational institutions. Resources will need to be set aside for purchasing hardware, software and infrastructure necessary for successful RPA implementation as well as ongoing maintenance costs that might incur due to upgrades (Noppen Philipand Beerepoot, 2020). RPA involves collecting and processing vast quantities of student and performance data, so ensuring data privacy and security becomes increasingly crucial in protecting sensitive information. Educational institutions should put into place rigorous data protection measures that comply with relevant privacy regulations to safeguard confidentiality and prevent unapproved access (Langmann Christianand Turi, 2022). RPA raises ethical concerns regarding its potential effect on educators. There must be a balance struck between automation and maintaining human interaction in education. Ethical considerations also extend to algorithmic bias, fairness, and transparency issues when designing or implementing RPA systems (Asadov, 2023). Implementing RPA requires adequate training and support for educators and staff members, in order to make best use of RPA technology. Professional development programs and on-going support should be offered to ensure an effortless transition and maximized use of this revolutionary solution (Kavitha, 2023). RPA implementation

may present several technical obstacles in complex educational environments. Integrating RPA into existing systems, platforms, and software may require customizations and compatibility checks, while any potential issues such as system failures, glitches or compatibility problems should be quickly addressed for smooth operation (Herm Lukas-Valentinand Janiesch, 2021).

Implementing RPA in education may meet with resistance from stakeholders who may be skeptical or wary about adopting new technologies. Overcoming resistance requires effective communication, training, and showing how RPA will enhance educational processes and outcomes. RPA may be useful for automating repetitive or rule-based tasks in educational environments that involve complex decision making, creativity or critical thinking; however, its role should not be seen as replacing human interaction or expertise from educators. (Noppen Philipand Beerepoot, 2020). Recognizing and responding effectively to RPA implementation challenges are paramount for its successful use in education. By being aware and taking preventative steps against them, educational institutions can maximize its benefits while mitigating risks responsibly while making ethical use of this technology.

Critical Elements for Effective RPA Implementation in Education Sector. To ensure the successful implementation of RPA technology in education and training environments, several key factors must be considered to ensure its successful deployment. Careful planning is key when it comes to the implementation of RPA in educational processes. A well-drafted plan should outline its objectives, scope, and expected results – taking into account any unique requirements or obstacles presented by an institution and aligning itself with its overall strategic goals (Herm Lukas-Valentinand Janiesch, 2021). Engaging all relevant stakeholders – such as educators, administrators, IT personnel and students – in the implementation of RPA is vital for its successful deployment. Their input and feedback provide essential insights into where RPA can bring the greatest returns while at the same time alleviating concerns or resistance to change. Educational institutions handle sensitive student information, so it's vital that RPA implementation prioritizes data privacy and security. Robust protocols and safeguards should be put in place to protect student data, comply with relevant regulations (such as GDPR or FERPA), ensure secure storage, access, transmission and use (Asadov, 2023). In order to properly assess RPA systems and ensure their effectiveness, identify areas for improvement, and address any emerging issues, ongoing monitoring and evaluation are vitally important. Through regular performance reviews, data analyses, and feedback loops you can optimize RPA processes that comply with evolving educational needs. (Noppen Philipand Beerepoot, 2020). Educational institutions are dynamic environments, and RPA solutions must be designed to adapt quickly to changing requirements. Being flexible will allow your RPA solution to accommodate curriculum updates, administrative

procedures changes and technological advancements while still scaling with your institution as it expands (Huang & Vasarhelyi, 2019). By considering these elements and effectively implementing RPA, educational institutions can transform their processes and enhance students' learning experiences: RPA allows educators and administrators to concentrate their attention on more strategic activities such as personalized instruction, curriculum development and student support instead of time-consuming administrative tasks that consume manual effort and incur errors. As RPA automates time-consuming administrative processes such as data entry or repetitive administrative duties such as payroll administration, errors are reduced considerably while manual effort required is reduced significantly allowing more productive use of educators' time for personalized teaching, curriculum creation or student support activities (Asadov, 2023). RPA-driven intelligent tutoring systems and adaptive assessments enable individualized learning experiences tailored to individual student needs. Through analyzing student performance data, RPA can deliver targeted feedback, adaptive content, and tailored learning pathways designed to increase engagement while encouraging mastery of concepts. (Yuan Boand Deng, 2023). RPA improves efficiency by streamlining workflows, decreasing administrative burden and speeding processes – saving educational institutions both time and money while helping them allocate their resources more effectively to enhance overall operational effectiveness. Educational institutions can leverage RPA technology's benefits to enhance instructional practices, foster student success and create more engaging learning environments. However, its implementation must be approached carefully - including stakeholder input as well as privacy and security issues while continuously adapting systems to meet evolving educational requirements.

References

1. Al-Raisi, S. Y. J. Smart Learning analytical model (SLAM) using LMS for Middle East College / S. Y. J. Al-Raisi, S. I. A. Kazmi, M. S. Hayat // *Journal of Student Research*. – 2022. – Vol. 11, № 2. – Art. 1478.
2. Asadov, R. Intelligent Process Automation: Streamlining Operations and Enhancing Efficiency in Management / R. Asadov // *SSRN Electronic Journal*. – 2023. – Art. 4495188.
3. Automating Student Management System Using ChatBot and RPA Technology / V. Gajra, K. Lakdawala, R. Bhanushali, S. Patil // *SSRN Electronic Journal*. – 2020. – Art. 3565321.
4. Herm, L.-V. From Symbolic RPA to Intelligent RPA: Challenges for Developing and Operating Intelligent Software Robots / L.-V. Herm, C. Janiesch, R. H. A., S. F. // *Business Process Management*. – 2021. – P. 289–305.
5. Hu, Y.-H. Developing an early-warning system through robotic process automation: Are intelligent tutoring robots as effective as human teachers? / Y.-H. Hu, J. S. Fu, H.-C. Yeh // *Interactive Learning Environments*. – 2023. – P. 1–14.
6. Huang, F. Applying robotic process automation (RPA) in auditing: A framework / F. Huang, M. A. Vasarhelyi // *International Journal of Accounting Information Systems*. – 2019. – Vol. 35. – Art. 100433.
7. Karn, S. RPA-based Implementation of IoT / S. Karn, R. Kotecha // *SSRN Electronic Journal*. – 2021. – Art. 3868873.
8. Kavitha, R. Hyperautomation-Beyond RPA: Leveraging Automation to Transform the Manufacturing Industries / R. Kavitha // *2023 ICCCI*. – 2023. – P. 1–5.
9. Application of Robotic Process Automation in education sector / S. Khan, R. K. Tailor, R. Pareek [et al.] // *Journal of Information and Optimization Sciences*. – 2022. – Vol. 43, № 7. – P. 1815–1834.
10. Langmann, C. Basics of Robotic Process Automation (RPA) / C. Langmann, D. Turi // *Robotic Process Automation (RPA) - Digitization and Automation of Processes*. – 2022. – P. 5–16.
11. Lasso-Rodríguez, G. Advanced Human-Robot Interaction for Learning with Robotic Process Automation / G. Lasso-Rodríguez, R. Gil-Herrera // *ICERI2019 Proceedings*. – 2019. – P. 7718–7723.
12. A Novel Design of Robotic hand Based on Bird Claw Model / F. G. Nabi, K. Sundaraj, V. Vijejan [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1997, № 1. – Art. 012034.
13. Noppen, P. How to Keep RPA Maintainable? / P. Noppen, I. Beerepoot, I. van de W. [et al.] // *Business Process Management*. – 2020. – P. 453–470.
14. Palaniappan, R. An Overview on Robot Process Automation: Advancements, Design Standards, its Application, and Limitations / R. Palaniappan // *Informatica*. – 2024. – Vol. 48, № 1. – P. 1–15.

UDC 681

A MINI REVIEW OF PRECISION AGRICULTURE, INTEGRATED SENSOR NETWORKS AND AI TECHNOLOGIES IN MITIGATING WATER SCARCITY IN ZIMBABWEAN AGRICULTURE

Tinotenda Mzembi¹, Munyaradzi Rushambwa¹, Peter Musiiwa¹,
Rajkumar Palaniappan², Vikneswaran Vijejan³

¹Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

²University of Technology Bahrain, Salmabad, Bahrain

³University Malaysia Perlis, Perlis, Malaysia

Abstract. The agricultural sector in Zimbabwe is dominated by smallholder farmers. They face severe water scarcity due to recurrent droughts and erratic rainfall. This mini-review focuses on the potential of combining together precision farming methods, integrated sensor networks, and artificial intelligence to try and combat these challenges. Monitoring parameters using sensors enables the collection of data in real-time for efficient irrigation. AI,

on the other hand, supports predictive analytics and optimised resource usage. Precision farming goes on to enhance the efficient use of water. These technologies, if used together, provide sustainable and climate-resistant food systems in Zimbabwe.

Keywords: precision agriculture, artificial intelligence, integrated sensor networks, drought, water scarcity.

*Address for correspondence: Harare Institute of Technology, P.O Box BE277, Belvedere, Harare. Zimbabwe
e-mail: t.mzembi@hit.ac.zw*

Introduction. Zimbabwe's agricultural sector, the foundation of its rural economy, faces structural vulnerability with over 70 % of the population relying on low-input, low-output rain-fed farming systems [1]. The nation's farmlands are drought-prone, with a staggering three quarters of smallholder areas receiving less than 650 mm of annual rainfall [2]. This has led to erratic rainfall patterns, frequent droughts, and increased food insecurity [3, 4]. This vulnerability is highly concentrated among smallholder farmers, who constitute the vast majority of the population and remain structurally disadvantaged by both their reliance on rain-fed practices and, crucially, their limited access to contemporary agricultural technology [5].

These problems necessitate the adoption of new technology [6]. This paper explores a solution for Zimbabwean agriculture that combines sensor networks, Artificial Intelligence (AI), and modern precision farming.

Drought and Water Scarcity. Droughts in Zimbabwe have become more frequent, impacting food security and livelihoods [4]. The unpredictable rainfall patterns and sustained high temperatures challenge the ability of communal households to secure their food supply through traditional dryland cultivation [3]. This has led to increased reliance on irrigation schemes, though these also face challenges such as water stress and competing water needs [4, 7].

Efforts to address drought impacts in Zimbabwe have included promoting drought-tolerant crop varieties, investing in irrigation rehabilitation, and adopting efficient water utilization practices like drip irrigation and mulching [8]. However, the implementation of digitalized agriculture in Zimbabwe remains low primarily due to factors like lack of high-throughput infrastructure, digital illiteracy, and strict regulations [9].

Integrated sensor networks in Agriculture. Integrated sensor networks are crucial for mitigating drought and water scarcity in agriculture by enabling precise, data-driven resource management [10, 11].

Real-time Data Collection. This concept enables farmers to make informed decisions. Sensors, like the soil moisture sensors, offer the essential data needed to determine precisely when irrigation is required and in what specific volume [12].

The system also relies on a network of environmental sensors that monitor critical atmospheric conditions that track key factors like air temperature, humidity, rainfall, and solar intensity. This continuous data stream is vital for calculating a precise picture of crop water requirements and potential evapotranspiration [13]. Crop health sensors can also be used to

detect stress, serving as an early indicator of water deficiency [12, 13].

Optimized Water Use Through Smart Irrigation. The data collected by sensor networks directly feeds into smart irrigation systems. This allows for the precise application of water only when and where it is needed. By understanding the exact soil moisture levels in different zones of a field, these systems can deliver water only to areas that require it, preventing over-watering and reducing water waste [12, 14]. Sensor networks are also used to detect sudden change in environmental conditions like rainfall or temperature allowing for dynamic adjustments to the water delivery in real-time [13].

Enhanced Crop Monitoring and Management

Monitoring parameters such as soil moisture and plant physiological responses allow sensor networks to timely intervene before significant yield loss occurs [13]. The data collected provides insights into the variability within a field. This promotes the more targeted application of other resources such as fertilizers, leading to more efficient overall farming operations and better resource allocation [15]. This is important in regions facing water scarcity and frequent droughts.

AI in agriculture. AI is instrumental in processing and analysing the big data generated by sensor networks. Solutions that are powered by AI enhance precision and control in farming techniques [16].

Predictive Analytics for Optimized Water Use. AI algorithms analyse historical weather data, current climate forecasts, soil moisture levels, and specific crop water requirements to develop highly accurate predictive models [17].

Such models can forecast when and how much crops require, allowing farmers to irrigate optimally. This in turn avoids over-watering and under-watering of crops. This precision helps in the reduction of water consumption significantly, thereby conserving water resources during periods of scarcity [18].

Intelligent Irrigation Systems. These systems integrate real-time data from sensor networks through monitoring soil moisture, weather conditions, and plant health together with AI algorithms to make dynamic irrigation decisions [19]. AI-supported systems can adjust irrigation schedules and water volumes instantaneously based on changes in evapotranspiration rates or sudden rainfall. Such capabilities ensure that crops receive the precise volume of water needed for optimum growth [20].

Resource Optimization and Decision Support. AI helps in optimizing the use of other farm inputs, such as fertilizers and pesticides, by understanding their interaction with crop water uptake and overall

plant health. This method ensures that there is efficient resource utilisation, leading to overall farm sustainability [21].

AI also easily combines with other digital farming tools to give farmers analytical power needed for informed, predictive decision-making. This helps to forecast potential issues related to water availability or crop stress before they become critical, enabling proactive management strategies [22].

Precision Farming. Precision farming uses technology to manage variability within agricultural fields, optimizing resource application for improved efficiency, increased yields, and reduced environmental impact [23].

Variable Rate Irrigation. This technique applies water precisely where and when needed, based on the specific requirements of individual plants or management units, minimizing waste and maximizing water use efficiency [20]. This can reduce water usage without compromising crop yield or product quality [24].

Drones and Remote Sensing. UAVs offer high-resolution imaging and real-time data collection, which are crucial for precision agriculture practices such as monitoring crop health and identifying areas requiring specific interventions [25].

Integrated Management Systems. Combining IoT sensors, drones, and AI-driven analytics allows farmers to optimize water, nutrient, and pesticide use, boosting yields while minimizing environmental impact [26]. This integrated approach enhances crop stability during droughts and contributes to long-term soil health [26].

Solutions for agriculture in Zimbabwe. The combined application of integrated sensor networks, AI, and precision farming proffer a comprehensive solution that helps in addressing drought and water scarcity in the Zimbabwean agricultural sector.

Tailored Irrigation. Implementing smart irrigation systems driven by sensor data and AI could drastically improve water use efficiency in smallholder irrigation schemes, which currently face challenges due to inefficient water management [4].

Early Warning Systems. Integrated sensor networks can provide real-time weather and environmental monitoring, allowing for early warnings of impending drought conditions, which are crucial for proactive measures [13].

Optimized Resource Allocation. AI-driven analytics can help in optimizing the distribution of drought-tolerant crop varieties and other farming inputs, ensuring they reach areas where they are most needed [8].

Capacity Building. To take advantage of these technologies, there is a need for supportive frameworks from the government, including subsidies for technology adoption, incentives for improving soil microclimate, and knowledge-sharing initiatives to encourage farmer adoption [26]. Digital literacy and infrastructure development are critical to bridge the gap between commercial and smallholder farmers in adopting these advanced solutions.

Conclusion. The fusion of sensor networks, Artificial Intelligence, and precision farming offers a compelling strategy to improve Zimbabwean agriculture. This results in water use efficiency, improved crop resilience, and stabilized food security. Sustained investment in infrastructure, focused research, and comprehensive farmer education is essential to ensure these solutions are equitably deployed and fully effective nationwide.

References

1. Sithole, P. K. Socio-economic impacts of climate change on indigenous communities in the save valley area of Chipinge district, Zimbabwe / P. K. Sithole, M. Mawere, T. R. Mubaya // *Frontiers in Environmental Economics*. – 2023. – Vol. 2. – Art. 1135831.
2. Drought Risk to Agricultural Systems in Zimbabwe: A Spatial Analysis of Hazard, Exposure, and Vulnerability/ J. Frischen [et al.] // *Sustainability*. – 2020. – № 3. – Art. 752.
3. Mhembwe, S. The contribution of small-scale rural irrigation schemes towards food security of smallholder farmers in Zimbabwe / S. Mhembwe, N. Chiunya, E. Dube // *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*. – 2019. – № 1. – Art. 674.
4. Muhoyi, E. Stakeholder consultations on small-scale irrigation schemes' constraints in Zimbabwe / E. Muhoyi, J. Mbonigaba // *Environment, Development and Sustainability*. – 2022. – Vol. 24, № 11. – P. 13198–13217.
5. Mujeyi, A. The impact of climate smart agriculture on household welfare in smallholder integrated crop–livestock farming systems: evidence from Zimbabwe / A. Mujeyi, M. Mudhara, M. Mutenje // *Agriculture & Food Security*. – 2021. – Vol. 10, № 1. – Art. 4.
6. Musa, P. Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations / P. Musa, H. Sugeru, E. P. Wibowo // *Sensors*. – 2023. – Vol. 24, № 1. – Art. 51.
7. Mwadzingeni, L. Risks of Climate Change on Future Water Supply in Smallholder Irrigation Schemes in Zimbabwe / L. Mwadzingeni, R. Mugandani, P. Mafongoya // *Water*. – 2022. – Vol. 14, № 11. – Art. 1682.
8. El Niño's Effects on Southern African Agriculture in 2023/24 and Anticipatory Action Strategies to Reduce the Impacts in Zimbabwe / H. Mugiyo, T. Mashizha, C. Moyo [et al.] // *Atmosphere*. – 2023. – Vol. 14, № 11. – Art. 1692.
9. Field phenotyping for African crops: overview and perspectives / D. K. Cudjoe [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1219673.
10. Wireless Networking: Smart Agriculture / V. B. Vijayan [et al.] // *Journal of Cyber Security Privacy Issues Challenges*. – 2024. – Vol. 3, № 1. – P. 32–37.
11. Sensor Based Irrigation Management in Crop Production: A Review / V. Surve [et al.] // *Annual Research & Review in Biology*. – 2024. – Vol. 39, № 4. – P. 1–4.
12. Smart Irrigation System Using IoT / J. Karpagam [et al.] // *ICACCS*. – 2020. – P. 1292–1295.
13. Pandey, S. An investigation on real-time insights: enhancing process control with IoT-enabled sensor networks / S. Pandey, M. Chaudhary, Z. Tóth // *Discover Internet of Things*. – 2025. – Vol. 5, № 1. – Art. 29.
14. Performance of a Wireless Sensor Network for Crop Water Monitoring and Irrigation Control / S. A. O'Shaughnessy [et al.] // 2012 Dallas, Texas, July 29 – August 1, 2012.
15. Nazarov, A. Harnessing precision agriculture technologies to enhance efficiency and yield in the agro-industrial complex / A. Nazarov, V. Sulimin, V. Shvedov // *BIO Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 121. – Art. 02010.

16. Maqbool, A. Automating Agriculture: The Impact of AI and IoT on Farming / A. Maqbool // International Journal of Research in Applied Sciences and Engineering Technology. – 2025. – Vol. 13, № 1. – P. 52–65.
17. Leveraging Artificial Intelligence in the Agri-Food Industry: A comprehensive review / A. Babakhouya [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 469. – Art. 00079.
18. Prediction of water distribution uniformity of sprinkler irrigation system based on machine learning algorithms / K. T. Elhussiny [et al.] // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13, № 1. – Art. 20885.
19. Integrating Artificial Intelligence into an Automated Irrigation System / N. C. Gaitan [et al.] // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 4. – Art. 1199.
20. Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions / E. A. Abioye [et al.] // AgriEngineering. – 2022. – Vol. 4, № 1. – P. 70–103.
21. Glória, A. Sustainable Irrigation System for Farming Supported by Machine Learning and Real-Time Sensor Data / A. Glória, J. Cardoso, P. Sebastião // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 9. – Art. 3079.
22. Nazarov, A. Harnessing precision agriculture technologies to enhance efficiency and yield in the agro-industrial complex / A. Nazarov, V. Sulimin, V. Shvedov // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 121. – Art. 02010.
23. Aned, N. G. S. Precision Irrigation: Sensor Network Based Irrigation / N. G. S. Aned, I. Das // Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. – 2012. – P. 199–216.
24. Assessing the Effectiveness of Variable-Rate Drip Irrigation on Water Use Efficiency in a Vineyard in Northern Italy / B. Ortuani [et al.] // Water. – 2019. – № 10. – Art. 1964.
25. Guebsi, R. Leveraging Drone Technology for Precision Agriculture: A Comprehensive Case Study in Sidi Bouzid, Tunisia / R. Guebsi, R. El Wai // Drones and Autonomous Vehicles. – 2025. – Vol. 2, № 2. – Art. 10006.
26. Ogwu, M. C. Integrating Green Infrastructure into Sustainable Agriculture to Enhance Soil Health, Biodiversity, and Microclimate Resilience / M. C. Ogwu, E. A. Kosoe // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, № 9. – Art. 3838.

UDC 681

ADVANCED MOTION PLANNING FOR REAL-TIME AND SCALABLE AUTONOMOUS SYSTEMS IN HIGH-DIMENSIONAL ENVIRONMENTS

Tamasha Chirimhanzi, Rudo Duri

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Enabling safe, scalable, and intelligent autonomy in complex environments remains central to next-generation robotics. Autonomous vehicles, surgical robots, and manipulators demand real-time motion planning resilient to high-dimensional complexity. Traditional algorithms struggle under kinodynamic constraints, motivating hybrid learning–planning architectures. Integrating deep reinforcement learning with sampling-based planners enhances exploration efficiency, while hierarchical control improves task decomposition. A checkpoint-based rewarding mechanism addresses internal reward contradictions, and Q-value–guided exploration ensures adaptive sampling. Anchored in Trustworthy AI and Operational Design Domain principles, this hybrid approach outperforms trial-and-error baselines and advances robust, explainable, and resource-efficient autonomy across dynamic, safety-critical robotic applications.

Keywords: hierarchical control, hybrid learning–planning, safety-critical robotics, reinforcement learning, trustworthy AI.

Address for correspondence: Harare Institute of Technology, P.O Box BE277, Belvedere, Harare. Zimbabwe
e-mail: rdurii@hit.ac.zw

Introduction. Advanced Motion Planning (AMP) is recognized as the foundational requirement for enabling true autonomy in sophisticated robotics applications, spanning critical fields such as autonomous vehicles (AVs), complex multi-modal robots, and intelligent surgical systems. These domains inherently involve operational environments characterized by continuous, high-dimensional state spaces, often necessitating complex kinodynamics and deep sensor fusion. Furthermore, these systems must tackle complex, long-horizon task objectives, demanding robust solutions for sequence planning and multi-object rearrangement. Classical path planning algorithms, exemplified by the original Rapidly exploring Random Tree (RRT) formulation, successfully established the core principles of algorithmic completeness, search efficiency, and quantifiable computational complexity. However, the efficacy of these traditional methods severely degrades when facing the escalating demands of modern, real-time autonomous operation. They consistently struggle to scale effectively against

critical constraints, particularly non-holonomic dynamics, intrinsic sensor uncertainty, and rapidly changing obstacle fields. This struggle highlights the necessity of evolving beyond classical techniques toward solutions capable of handling the dual challenges of kinodynamic and combinatorial complexity inherent in real-world automation.

Literature Review. The literature presents a compelling case for the necessity of Hybrid Learning–Planning Architectures to advance scalable automation. A core innovation, demonstrated in autonomous vehicle trajectory tracking, is the synergy of Deep Reinforcement Learning (DRL) with Rapidly exploring Random Trees (RRT) to overcome sample inefficiency and insufficient exploration via RRT's state space coverage, guided by the agent's predicted Q-values. This approach to Advanced Motion Planning (AMP) scales further through Agentic AI concepts, which utilize hierarchical decomposition (like MCTS/HRL) to manage combinatorial complexity across diverse fields, including nonprehensile rearrangement and surgical robotics. Crucially, the successful deployment of these

systems requires rigorous adherence to Trustworthy AI (TAI) principles and the management of sociotechnical risks, often analyzed through frameworks like SOTEC, ensuring auditability and compliance within specific Operational Design Domains (ODD).

Relevance. The field is currently undergoing a transformative period marked by the integration of deep learning techniques, particularly Deep Reinforcement Learning (DRL), directly into the planning pipeline [26; 27]. This integration is motivated by the need for agents to learn complex, non-linear policies that conventional control methods cannot efficiently derive or compute in real time. Modern automated systems increasingly demand not just collision-free paths, but also robust, adaptive, and generalizable behavior across large Operational Design Domains (ODDs) [8; 19]. Meeting this level of autonomy requires planning methods capable of simultaneously addressing two fundamental dimensions of complexity. The first is kinodynamic complexity, which involves handling massive continuous state-action spaces and system dynamics, such as vehicle trajectory tracking. The second is combinatorial complexity, which arises from the exponential growth of sequential decision-making required in multi-step or multi-object tasks, such as object ordering [5].

Methodologies. **Simulation Environment Setup:** Develop a testbed with realistic kinodynamic constraints, feature-based state representation, and both continuous and discrete action spaces to model autonomous vehicles, manipulation, and multi-object tasks. **Hybrid DRL-Planning Integration:** Combine Deep Reinforcement Learning (DRL) with Rapidly-exploring Random Trees (RRT) to improve sample efficiency. Use Q-value-guided node selection, probabilistic rollout strategies, and checkpoint-based rewards to accelerate learning. **Hierarchical Control Framework:** Employ a high-level Monte Carlo Tree Search (MCTS) policy for sequencing, supported by Imitation Learning (IL) and refined with Proximal Policy Optimization (PPO). Use low-level planners (e.g., A*) for precise trajectory execution. **Trustworthy AI (TAI) and ODD Evaluation:** Align system design with Trustworthy AI principles by defining Operational Design Domains (ODDs) and applying the SOTEC framework to assess risks, resilience, transparency, and auditability. **Evaluation and Validation:** Benchmark performance using metrics such as success rate, trajectory quality, sample efficiency, computational cost, and compliance with TAI. Compare results against baseline and hierarchical methods to validate scalability and real-world readiness.

Discussion. The future research agenda in automation and intelligent planning converges on four tightly coupled domains. In planning and control architectures, emphasis lies on extending DRL/RRT to continuous action spaces, adapting trajectory tracking to dynamic bicycle models, validating hybrid DRL/RRT across diverse application domains, optimizing MCTS for real-time nonprehensile multi-ob-

ject rearrangement, and ultimately developing learning-only sequencing policies to eliminate reliance on rollout planning. Within trustworthy AI and governance (TAI), research must advance by standardizing auditability metrics for high-risk ODDs, enhancing explainable AI for decision interpretability, integrating IRL/CIRL approaches for robust value alignment, embedding hazard-highlighting mechanisms to address out-of-distribution inputs, and establishing full-stack feedback sensing systems to strengthen HRI and REI resilience. In the domain of advanced learning and agentic systems, focus should be placed on decentralized multi-agent coordination, hierarchical reinforcement learning and temporal reasoning for long-horizon objectives, leveraging intrinsic motivation for exploratory efficiency, and advancing meta-learning and transfer learning techniques to enable rapid adaptation in dynamic tasks. Finally, hardware and efficiency (Green AI) research must prioritize energy-efficient hardware for constrained edge deployments, explore miniaturization and heterogeneity in swarm robotics, integrate steering and manipulation into monolithic or soft robotic systems, optimize valve designs in soft robotics to support higher oscillation frequencies, and accelerate UAV VR streaming via dedicated hardware encoders such as NVENC.

The authors would like to express their sincere gratitude to the Harare Institute of Technology and the Belarusian National Technical University for providing academic and research support throughout this work. Special thanks are extended to our supervisors and colleagues for their valuable insights and constructive feedback, which greatly improved the quality of this study.

References

1. Lynch, K. M. Stable pushing: Mechanics, controllability, and planning / K. M. Lynch, M. T. Mason // *The Int. Jour. of Robotics Research.* – 1996. – № 6. – P. 533–556.
2. Vose, T. H. Vibration-induced frictional force fields on a rigid plate / T. H. Vose, P. Umbanhowar, K. M. Lynch // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* – 2007. – P. 660–667.
3. Maeda, Y. Motion planning of robot fingertips for grasplless manipulation / Y. Maeda, T. Nakamura, T. Arai // *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04.* – 2004. – Vol. 3. – P. 2951–2956.
4. Anderson, R. L. A Robot Ping-Pong Player: Experiment in Real-Time Intelligent Control / R. L. Anderson. – MIT Press, 1988. – 215 p.
5. Krontiris, A. Dealing with Difficult Instances of Object Rearrangement / A. Krontiris, K. Bekris // *Robotics: Science and Systems.* – 2015. – URL: <http://dx.doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.045> (date of access: 15.11.2024).
6. Object rearrangement using learned implicit collision functions / M. Danielczuk, A. Kurenkov, A. Balakrishna [et al.] // *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* – 2021. – P. 6010–6017.
7. Visual foresight tree for object retrieval from clutter with nonprehensile rearrangement / B. Huang, S. D. Han, J. Yu [et al.] // *arXiv.* – 2021. – arXiv:2105.02857.
8. Monte-Carlo tree search for efficient visually guided rearrangement planning / Y. Labbé [et al.] // *IEEE Robotics and Automation Letters.* – 2020. – № 2. – P. 3715–3722.

9. Kinodynamic randomized rearrangement planning via dynamic transitions between statically stable states / J. A. Haustein [et al.] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015. – P. 3075–3082.

10. Haustein, J. A. Non-prehensile rearrangement planning with learned manipulation states and actions / J. A. Haustein, J. King, S. Srinivasa // Workshop "Machine Learning in Robot Motion Planning". – 2018. – 6 p.

11. Nonprehensile whole arm rearrangement planning on physics manifolds / J. E. King, M. Cagnetti, S. S. Srinivasa [et al.] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015. – P. 2508–2515.

12. King, J. E. Rearrangement planning using object-centric and robot-centric action spaces / J. E. King, M. Cagnetti, S. S. Srinivasa // 2016 IEEE ICRA. – 2016. – P. 3940–3947.

13. Hart, P. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths / P. Hart, N. Nilsson, B. Raphael // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – Vol. 4, № 2. – P. 100–107.

14. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning / S. M. LaValle, J. J. Kuffner, B. Donald [et al.] // Technical Report. – 1998. – 12 p..

UDC 681

AUTONOMOUS ASSISTIVE EXOSKELETON CONTROL SYSTEM INTEGRATING EEG/EMG INTENT DECODING

Sean T. Muchenje¹, D. Simango¹, D. T. Makusha², Brian Sibanda¹

¹Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, Zimbabwe

²Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Mobility impairments caused by spinal cord injuries, stroke, and degenerative disorders limit independence for millions worldwide. This study presents a low-cost lower-limb exoskeleton that decodes user intention in real time using electroencephalographic (EEG) and electromyographic (EMG) signals. The system employs a PIC16F877A microcontroller executing adaptive impedance control and gait-phase recognition, with a Kalman filter combining inertial, torque, and bio-signal inputs to generate smooth hip-knee trajectories. Bench-top and hardware-in-the-loop simulations classified four locomotor commands – stand, sit, walk, stop – with 96 % accuracy and a maximum 85 ms latency. The lightweight 3.8 kg aluminium-carbon frame, powered by back-drivable BLDC motors, reproduced natural hip excursions of 15–35° at 1.2 s cadence. The results validate the feasibility of embedding edge AI for assistive gait restoration in resource-constrained clinical contexts.

Keywords: exoskeleton, EEG, EMG, intent recognition, adaptive control, rehabilitation.

Address for correspondence: Doubt Simango, Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe

e-mail: dsimango@cut.ac.zw

Introduction. Conventional mobility aids such as orthoses and wheelchairs fail to reproduce the energy-efficient gait needed for full ambulation. Recent progress in wearable robotics and brain-computer interfaces enables motor-intention decoding directly from biosignals. However, most commercial systems rely on gel-based electrodes and GPU-class processors, increasing cost and complexity (Kim et al., 2023; Wang et al., 2024). This work develops a dry-electrode EEG/EMG fusion control running entirely on an 8-bit microcontroller. The design targets affordability, portability, and clinical readiness through integration of lightweight materials, modular sensors, and efficient learning algorithms.

Materials and Methods. The exoskeleton frame combines 7075-T6 aluminium for load-bearing links and carbon-fibre composite for spinal and distal braces, achieving strength above 550 MPa at one-third the density of steel. Ti-6Al-4V fasteners ensure fatigue resistance, while neoprene-EVA liners improve comfort and reduce vibration noise on EMG leads. The full hip-to-ankle assembly weighs < 4 kg and delivers > 2 Nm/kg peak knee torque. EEG signals are captured using gold-plated dry pins on flexible polyimide, while EMG uses Ag/AgCl hydrogel electrodes on thigh and calf regions. Both channels feed a low-noise ADS1299 analog front-end digitized at 250 Hz. A Kalman filter fuses EEG, EMG, and inertial signals; extracted features are processed by

a two-layer LSTM to infer locomotor intent every 50 ms. The PIC16F877A executes PID loops for dual Maxon EC-90 BLDC motors via DRV8353 drivers, generating compliant joint motion. A 78 kg volunteer performed sit-stand and walk sequences on a fixed-support rig. Firmware and MATLAB hardware-in-loop simulations evaluated command accuracy and latency.

Results and Discussion. The LSTM converged within 100 epochs, achieving 0.17° RMSE in hip-angle prediction. Synthetic gait trials produced 12 correctly identified heel-strike events in 10 s, with hip velocity $\pm 150^\circ \text{ s}^{-1}$ and acceleration $\leq 1500^\circ \text{ s}^{-2}$. EMG envelope thresholds reliably toggled between locomotor states. The Kalman filter reduced sensor noise by ~80 %, producing stable velocity and angle profiles. The prototype confirmed that dry EEG/EMG sensors paired with microcontroller-level inference can achieve millisecond-scale responsiveness, previously attainable only with GPU systems. The hybrid aluminium-carbon frame ensures back-drivable comfort while retaining mechanical integrity. Remaining limitations include limited user trials and short-duration testing; long-term reliability under sweat and electrode drift requires further study.

Conclusion. The developed system successfully demonstrates a lightweight, low-cost exoskeleton capable of translating EEG/EMG-derived intent into

smooth lower-limb motion. The fusion of dry bio signals, Kalman-LSTM control, and back-drivable actuation achieved high accuracy and minimal delay on compact hardware. These results highlight a viable path toward affordable assistive exoskeletons suitable for rehabilitation and daily-living mobility support. Continued research will focus on real-world gait trials and energy optimization.

Acknowledgements. The authors thank the Mechatronics Laboratory, Chinhoyi University of Technology, for technical support and facilities.

References

1. Adaptive impedance control for wearable exoskeleton robots / S. Bai, W. Song, H. Ma, X. Liu // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 5. – Art. 1579.

2. Powered exoskeletons for bipedal locomotion after spinal cord injury / J. L. Contreras-Vidal [et al.] // *Journal of Neural Engineering*. – 2016. – № 3. – Art. 031001.

3. Dollar, A. M. Lower-extremity exoskeletons and active orthoses / A. M. Dollar, H. Herr // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2008. – Vol. 24, № 1. – P. 144–158.

4. Neuralink and the brain-machine interface / E. Musk [et al.] // *Nature Neuroscience*. – 2020. – Vol. 23, № 2. – P. 245–256.

5. Williams, R. Integration of AI in exoskeleton control systems / R. Williams, L. Brown // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. – 2022. – Vol. 30, № 5. – P. 789–799.

6. World Health Organization. World Report on Disability / WHO. – Geneva: World Health Organization, 2011. – 350 p.

UDC 681

HEALTHCARE 4.0 TECHNOLOGIES FOR PATIENT TRANSFER IN OPERATING THEATRES: A SYSTEMATIC REVIEW

Winnie Mutenhabundo, Kudzanayi Chiteka, Rindai Mahoso, Munyaradzi Mupona

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Safe patient transfer in operating theatres is vital yet often neglected, exposing healthcare workers to musculoskeletal injuries and patients to avoidable risks. Healthcare 4.0 combining Artificial Intelligence (AI), Internet of Medical Things (IoMT), robotics, and cloud computing offers solutions for safer and more efficient workflows. This systematic review of 32 studies (2019–2023) found that AI predicts complications, robotics reduce caregiver strain by up to 40 %, IoMT supports continuous monitoring, and cloud platforms streamline operations. However, in low- and middle-income countries such as Zimbabwe, adoption is hindered by cost, infrastructure, and skills gaps, requiring phased, low-cost digital integration.

Keywords: Healthcare, Health 4.0, patient transfer, AI, robotics.

Address for correspondence: Winnie Mutenhabundo, 277 Ganges Road, Belvedere, Harare, Zimbabwe
e-mail: wmutenhabundo@hit.ac.zw

Introduction. Patient transfer in operating theatres is a critical element of perioperative safety, yet it continues to rely heavily on manual handling methods. The World Health Organization (2021) reports that nearly 40 % of nurses experience chronic back pain from patient transfer activities, contributing to absenteeism and reduced productivity. Traditional aids like slide sheets and hoists partially mitigate physical strain but fail to enhance workflow efficiency or address real-time risk factors. Healthcare 4.0 technologies—AI, IoMT, robotics, and cloud computing—are increasingly deployed to bridge these gaps by enabling data-driven, automated, and adaptive patient transfer systems. In high-income settings, robotic-assisted transfer systems have reduced nurse strain by up to 40 % (Kim et al., 2024), but LMICs such as Zimbabwe face infrastructural and financial limitations.

Background and Conceptual Framework. Healthcare 4.0 represents the evolution from earlier healthcare generations: digitisation (Healthcare 2.0) and telemedicine (Healthcare 3.0) to fully integrated, data-intelligent systems (Healthcare 4.0). Drawing from Industry 4.0, it incorporates cyber-physical systems, IoMT, AI, and cloud computing for seamless connectivity, automation, and analytics (Li et al., 2017; Mwanza et al., 2023). AI enhances predictive monitoring, detecting early signs of patient distress or

mechanical malfunction, while robotics reduce the need for physical lifting (Lin et al., 2021). IoMT networks integrate wearables and smart sensors to collect continuous data, enabling cloud-based decision support (Taylor et al., 2023). Together, these innovations promote precision, safety, and efficiency in perioperative workflows.

However, in LMICs, widespread deployment faces systemic barriers—limited broadband connectivity, unstable power supply, and cost constraints (Muchiri, 2022). Context-appropriate approaches, such as low-cost IoMT devices and semi-automated transfer mechanisms fabricated from locally available materials, have shown promise (Richarz et al., 2023). These frugal innovations emphasize adaptability, affordability, and scalability as foundational principles for healthcare digital transformation in developing contexts.

Methodology. This review followed PRISMA guidelines (Moher et al., 2010). Databases searched included Scopus, PubMed, Web of Science, IEEE Xplore, and ScienceDirect for the years 2019–2023. Keywords included “Healthcare 4.0”, “patient transfer”, “AI”, “robotics”, “IoMT”, and “cloud computing.” A total of 243 records were retrieved, 48 duplicates removed, and 195 screened. Following full-text review, 32 studies met inclusion criteria: peer-

reviewed, English, and focused on perioperative patient transfer using Healthcare 4.0 technologies. Data were categorized thematically into benefits, challenges, and contextual implications for LMICs.

Discussion. The synthesis demonstrates that Healthcare 4.0 technologies transform perioperative workflows through automation and predictive intelligence. AI-based models analyse physiological data to forecast transfer complications, while robotic systems automate high-risk lifting and movement tasks, reducing strain-related injuries. IoMT platforms interconnect monitoring systems to cloud analytics, allowing proactive safety alerts and workflow optimization. These integrated systems have improved nurse well-being, reduced operational errors, and increased patient safety in technologically advanced hospitals (Kim et al., 2024).

Nevertheless, high equipment costs, weak digital infrastructure, and limited workforce digital literacy impede implementation in LMICs. Ethical and regulatory issues—especially data privacy, algorithmic bias, and accountability for AI-driven errors—remain unresolved (Moghaddasi et al., 2021). Furthermore, many healthcare workers in resource-constrained settings express resistance to automation, fearing job displacement and reduced human interaction with patients.

To overcome these barriers, phased and locally driven adoption strategies are vital. Early-stage integration of IoMT and AI tools using mobile platforms can deliver immediate safety gains without major capital investment, (Al-Assaf et al., 2024). Medium-term strategies can introduce semi-automated systems in tertiary hospitals, supported by national digital health frameworks. In the long term, fully networked AI-robotic systems could synchronize with cloud-based national health databases, enhancing resource planning, predictive maintenance, and clinical coordination.

For Zimbabwe, a phased roadmap is proposed: (i) short term (1–2 years) – deploy IoMT sensors and AI monitoring in district hospitals; (ii) medium term (3–5 years) – introduce robotic aids in tertiary hospitals such as Parirenyatwa and Mpilo Central; and (iii) long term (5–10 years) – integrate cloud-linked AI-robotic systems nationwide. This strategy balances feasibility, scalability, and alignment with existing e-health initiatives.

Conclusion and Recommendations. Healthcare 4.0 offers a viable pathway to safer and more efficient patient transfer practices. While developed countries have achieved measurable gains, LMICs require strategic, cost-sensitive adoption models. Zimbabwe and similar nations should prioritize digital infrastructure, training, and policy frameworks to enable gradual integration of AI, IoMT, and robotics. A strong public–private partnership model can support funding and local innovation, ensuring sustainability. Future studies should investigate ethical frameworks, cost-effectiveness analyses, and pilot-scale implementation to guide large-scale Healthcare 4.0 transformation in African hospitals.

Acknowledgments. The authors express their sincere gratitude to the Harare Institute of Technology, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, for providing technical support and access to research facilities. Special thanks are extended to colleagues and reviewers whose constructive feedback helped refine this study. The authors also acknowledge the valuable contributions of all healthcare professionals who shared insights that informed the contextual analysis of Healthcare 4.0 technologies in Zimbabwe.

References

1. Industrial wireless networks in the context of Industry 4.0 / X. Li, W. Zhang, H. Wang [et al.] // *Wireless Networks*. – 2017. – Vol. 23, № 1. – P. 23–41.
2. Moher, D. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement / D. Moher [et al.] // *International Journal of Surgery*. – 2010. – Vol. 8, № 5. – P. 336–341.
3. Mwanza, J. Impact of Industry 4.0 on healthcare systems of LMICs: A systematic review / J. Mwanza, A. Telukdarie, T. Igusa // *Health and Technology*. – 2023. – Vol. 13, № 1. – P. 35–52.
4. Usability of smart transfer-assistive robots for care workers / Y. S. Kim [et al.] // *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. – 2024. – № 8. – P. 1864–1870.
5. Impact of mechanical devices on musculoskeletal injuries in healthcare personnel / H. Richarz [et al.] // *Journal of Occupational Health*. – 2023. – № 1. – Art. e12423.
6. Wearable Vital Signs Monitoring for Patients With Asthma: A Review / L. Taylor [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – Vol. 23, № 3. – P. 1734–1751.
7. World Health Organization. Occupational safety and patient transfer risks in healthcare / WHO. – Geneva: World Health Organization, 2021. – 89 p.

UDC 681

THE IMPERATIVE OF QUALITY ASSURANCE: ENHANCING ENGAGEMENT AND RETENTION OF GENERATION Z IN ONLINE ENGINEERING EDUCATION Musiiwa F., Nyaude P.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract This paper examines how Quality Assurance (QA) frameworks can be adapted to boost engagement and retention among Generation Z learners in online Electronic Engineering courses. It emphasizes the unique expectations of Gen Z interactivity, relevance, and technological integration and critiques traditional online delivery methods. The study introduces a three-pillar, Gen Z-focused QA framework: Agile and Authentic Pedagogy, a Technologically Rich Ecosystem, and Holistic Student Support Systems. By aligning instructional design, technology, and student support, this model enhances motivation, learning effectiveness, and persistence in challenging engineering programs.

Keywords: quality assurance, generation Z, online learning, engineering education, student engagement.

Address for correspondence: Farai Musiiwa, BE277 Belvedere, Harare, Zimbabwe
e-mail: fmusiiwa@hit.ac.zw

Introduction. Engineering education globally faces persistent challenges of low engagement and student attrition, particularly in online environments. The shift to digital platforms, accelerated by the COVID-19 pandemic, exposed weaknesses in conventional course design that often fail to meet the learning preferences of Generation Z. Surveys of Gen Z engineering students report that over 60 % find conventional online lectures disengaging, citing a lack of interactivity and practical relevance [1]. This cohort, born into a fully digital era, values experiential, interactive, and career-relevant learning. Traditional online pedagogy largely content-driven, does not align with Gen Z's demand for immediacy, collaboration, and authenticity. This study situates these generational learning trends within a quality assurance (QA) perspective, arguing that future-focused QA must move beyond compliance to embrace innovation, engagement, and personalization [2].

Purpose. The purpose of this study is to conceptualize a Generation Z-centric QA framework that strengthens engagement and retention in online engineering education. It builds on existing QA principles but reorients them around learner experience. The framework seeks to close the gap between institutional quality standards and the dynamic expectations of digital-native students [2]. It aims to provide educators and policymakers with a roadmap for designing courses that are technologically adaptive, pedagogically responsive, and emotionally supportive – ensuring quality as a lived learning experience rather than a bureaucratic metric [3].

Conceptual Framework: Understanding Generation Z and the QA Framework. This study's conceptual framework links the learning habits of Generation Z with quality assurance (QA) in online engineering education. Generation Z, born between 1997 and 2012, are digital natives who prefer fast, interactive, and practical learning. They value self-paced study, continuous feedback, collaboration, and real-world problem-solving. The framework adapts to these traits through a student-centred QA system built on three pillars: Agile and Authentic Pedagogy, which connects engineering theory to hands-on projects; Technologically Rich Ecosystem, providing accessible online tools and platforms for experimentation and peer learning; and Holistic Student Support, offering guidance, mentorship, and emotional support. These pillars work together in a continuous loop, adjusting teaching, assessment, and support based on student engagement and available resources [3]. In Zimbabwe, the framework considers local realities such as limited internet connectivity, device shortages, and economic challenges. Strategies like low-data online tools, community mentorship, and projects linked to local industry ensure the QA system is responsive and practical. By focusing on relevance and adaptability, the three pillars together improve

student engagement, retention, and the overall quality of learning [4].

Methods. The study adopts a conceptual synthesis approach, drawing from interdisciplinary literature in engineering education, quality assurance, and digital pedagogy. It integrates insights from established QA frameworks such as Quality Matters (QM) and the Online Learning Consortium (OLC) Dimensions of Quality, adapting them for Generation Z's cognitive and social learning traits. Empirical findings from the American Society for Engineering Education (ASEE), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), and ResearchGate studies on gamification, microlearning, and virtual laboratories inform the proposed framework. The synthesis emphasizes convergence between educational psychology and QA principles, focusing on learner engagement, access, and institutional accountability [5].

Results and Discussion. The Gen Z-centric QA framework becomes particularly meaningful in the Zimbabwean context when adapted to local realities of online engineering education. Relevance here refers to making quality assurance processes practical, relatable, and responsive to the needs of Zimbabwean learners who often face challenges such as limited internet access, varying digital literacy, and constrained institutional resources. Customization ensures that learning remains engaging and accessible, even within these constraints, while aligning with Generation Z's digital strengths and aspirations [6].

In the Agile and Authentic Pedagogy pillar, relevance is achieved by linking engineering theory to local and regional industry challenges. For instance, students can design and simulate renewable energy solutions that address Zimbabwe's power supply issues or develop water purification systems for rural communities. Such projects make learning both contextual and purposeful. Microlearning, delivered through low-data platforms or offline-accessible videos, caters to the digital habits and connectivity realities of Zimbabwean learners. Gamification strategies – like leader boards or mobile-friendly quizzes – maintain engagement in a culturally familiar and cost-effective way.

The Technologically-Rich Ecosystem pillar emphasizes using accessible and scalable technologies suited to Zimbabwe's educational infrastructure. Locally hosted learning management systems, open-source software, and lightweight mobile tools such as WhatsApp study groups or Moodle forums support interactive learning without requiring expensive devices or high bandwidth. Integrating AI-driven feedback systems can be phased in gradually, using existing university data systems to track progress and offer targeted support. This ensures that technology serves as a bridge rather than a barrier to quality education [5]. The Holistic Student Support pillar highlights the importance of social and emotional relevance in

Zimbabwe's higher education landscape. Many students face economic, social, and psychological pressures that affect their academic success. Data-informed advising and peer mentoring – when grounded in empathy and local cultural values – help identify at-risk learners early and provide tailored interventions. Community-based mentorship, where senior students or alumni guide juniors, can foster belonging and motivation even in virtual spaces.

Overall, adapting this QA framework to Zimbabwe ensures that quality becomes a lived and equitable experience rather than a theoretical standard. By aligning pedagogy, technology, and support systems with the realities of Zimbabwean students – balancing innovation with accessibility – the framework redefines quality assurance as a process of inclusion, engagement, and locally grounded continuous improvement [7].

Conclusion. The integration of agile pedagogy, digital ecosystems, and student-centered support redefines QA for online engineering education. By embedding engagement metrics into quality assurance systems, institutions can achieve continuous improvement that resonates with Generation Z learners. The framework accentuates the need for adaptability, empathy, and data-driven decision-making in QA processes. Future research should focus on pilot testing this model across engineering faculties to

assess scalability, cost-effectiveness, and cultural adaptability in developing contexts such as Zimbabwe.

References

1. Berková, K. The Impact of Socio-Demographic Factors on the Use of Digital Learning Platforms and Forms of Learning by Generation Z Engineering Students / K. Berková, A. Kubišová, K. Krelková, P. Krpálek, L. Holečková // *International Journal of Engineering Pedagogy*. – 2024. – Vol. 14, № 8. – P. 4–23.
2. Quality Matters. Quality Standards for Online and Hybrid Courses / Quality Matters. – Annapolis: Quality Matters, 2024. – 65 p. – URL: <https://www.qualitymatters.org/> (date of access: 15.11.2024).
3. Online Learning Consortium. OLC Dimensions of Quality / Online Learning Consortium. – Boston: Online Learning Consortium, 2024. – 48 p.
4. Wahyudi, S. Effectiveness of Virtual Laboratories in Engineering Education / S. Wahyudi // *ResearchGate*. – 2023. – 15 p.
5. Javaid, M. Project-Based Learning in Online Electronics Courses / M. Javaid // *ASEE Conference Proceedings*. – 2021. – P. 34567–34578.
6. Barnes & Noble College. Getting to Know Gen Z Learners / Barnes & Noble College. – New York: Barnes & Noble College, 2018. – 32 p.
7. Axon Park. How Effective is Gamification in Education? / Axon Park. – San Francisco: Axon Park, 2023. – 28 p.

UDC 681

AI AND COMPUTER VISION-BASED PEST AND DISEASE DETECTION FOR GREENHOUSE CROPS IN ZIMBABWE

Panashe G. Mahungwe¹, Doubt Simango¹, Makusha D. T.², Musaidzi H.¹

¹Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, Zimbabwe

²Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Pests and diseases remain a major constraint to agricultural productivity in Zimbabwe, causing significant losses and limiting farmers' income. In greenhouse farming, early detection of infestations is critical to ensure healthy crops and reduce pesticide overuse. This study presents a computer-vision system powered by artificial intelligence (AI) for early identification of common pests and diseases in greenhouse crops. A convolutional neural network (CNN) trained on a regionally curated dataset of healthy and diseased plant images automatically classifies visual symptoms from digital photographs. The system is implemented through a MATLAB desktop application, enabling offline classification for users with limited internet access. The CNN achieved 83 % training accuracy and 82 % validation accuracy, with high precision and recall across multiple crop categories. Testing confirmed reliable detection of leaf curl, septoria leaf spot, and related infections in tomatoes and peppers. This work demonstrates that locally trained deep-learning models can effectively support greenhouse farmers in Zimbabwe, enhancing early response and minimizing losses due to pest and disease outbreaks.

Keywords: AI, computer vision, pest detection, CNN, greenhouse farming, image classification.

Address for correspondence: Doubt Simango, Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe
e-mail: dsimango@cut.ac.zw

Introduction. Agriculture forms the economic backbone of Zimbabwe, providing livelihoods to more than 60 % of the population (FAO, 2020). Greenhouse farming is expanding as a response to drought and erratic rainfall (Chikulo, 2020), offering a controlled environment for year-round production. However, these enclosed systems are prone to rapid pest and disease spread (Mutambara, 2021), and manual inspection methods are time-consuming and inconsistent. Recent advances in artificial intelligence and deep learning allow visual recognition of plant

stress directly from images. Studies by Mohanty et al. (2016) and Ferentinos (2018) show that CNNs can classify plant diseases with >90 % accuracy. Yet, many of these systems are trained on datasets from other regions and may fail under African conditions. This work proposes a localized AI tool for Zimbabwean greenhouses, combining CNN-based pest recognition with a simple MATLAB graphical interface to promote accessibility and reduce dependence on cloud computing.

Materials and Methods. Images were sourced from PlantVillage and Kaggle, covering tomatoes, cucumbers, onions, potatoes, lettuce, and peppers. Both healthy and diseased samples were included. Images were resized to 224×224 pixels, normalized, and augmented by random rotation, flipping, and brightness adjustment to improve model generalization. A custom Convolutional Neural Network consisting of convolution, ReLU, pooling, and fully connected layers was trained using the Adam optimizer with categorical cross-entropy loss. The dataset was split 80:20 for training and validation. Performance metrics included accuracy, precision, recall, and F1-score, computed from the confusion matrix (Fig. 1). To enhance usability, a MATLAB App Designer graphical user interface was developed (Fig. 2). Users can upload an image, trigger classification, and receive instant feedback on crop health status. The application runs offline and is optimized for low-specification computers commonly available to smallholder farmers.

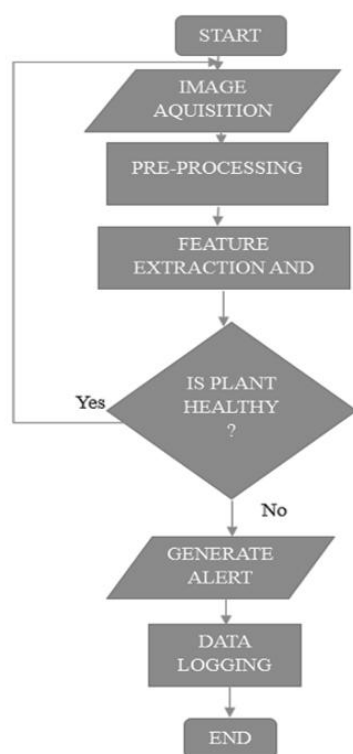


Figure 1 – System flowchart

Results and Discussion. The CNN achieved 83.10 % training and 82.15 % validation accuracy, demonstrating effective learning despite limited image diversity. Precision and recall values exceeded 80 % for most disease categories, confirming the model's diagnostic reliability. Random testing produced 100 % accuracy on sample batches, verifying consistency. The MATLAB GUI accurately classi-

fied all tested crop images, with users reporting an intuitive interface. Localization of datasets proved critical: using Zimbabwe-specific crops improved detection accuracy under regional lighting and humidity conditions. Data augmentation techniques further strengthened the model's robustness against image variations. However, limitations persist—class imbalance, uneven lighting, and lack of embedded real-time deployment restrict field scalability. Future work will integrate low-cost cameras and IoT modules for continuous greenhouse monitoring.

Conclusion. This project demonstrates a low-cost, AI-driven vision system capable of detecting and classifying common pests and diseases affecting greenhouse crops in Zimbabwe. The integration of a CNN model with an offline MATLAB GUI offers a practical decision-support tool for local farmers, reducing reliance on manual inspection and enabling early intervention. Continued expansion of region-specific image datasets and deployment on embedded hardware will further improve reliability and real-time performance, advancing sustainable greenhouse production across Zimbabwe.

Acknowledgements. The authors acknowledge Mechatronics Laboratory team.

References

1. Chikulo, B. C. Sustainable agricultural practices and food security in Zimbabwe / B. C. Chikulo // *Journal of Sustainable Agriculture*. – 2020. – 44, № 3. – P. 245–267.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Zimbabwe Agricultural Outlook 2020–2030 / FAO. – Rome: FAO, 2020. – 156 p.
3. Ferentinos, K. P. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis / K. P. Ferentinos // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2018. – Vol. 145. – P. 311–318.
4. He, Y. A review on deep learning in crop phenotyping / Y. He, W. Zhang, X. Chen [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 123456–123470.
5. Li, D. Crop pest recognition based on deep learning / D. Li, J. Wang, Z. Liu [et al.] // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, № 19. – Art. 4353.
6. Mohanty, S. P. Using deep learning for image-based plant disease detection / S. P. Mohanty, D. P. Hughes, M. Salathé // *Frontiers in Plant Science*. – 2016. – Vol. 7. – Art. 1419.
7. IoT-based crop monitoring for smallholder farmers in Africa / E. Mwebaze [et al.] // *IEEE AFRICON*. – 2019. – P. 1–6.
8. Mutambara, J. Digital transformation of agriculture in Zimbabwe: challenges and opportunities / J. Mutambara // *Zimbabwe Agricultural Journal*. – 2021. – Vol. 58, № 2. – P. 89–104.
9. Brahimi, M. Deep learning for plant diseases: a comparative study / M. Brahimi, K. Boukhalfa, A. Moussaoui // *Applied Artificial Intelligence*. – 2018. – Vol. 32, № 1. – P. 1–15.
10. Kamilaris, A. Deep learning in agriculture: a survey / A. Kamilaris, F. X. Prenafeta-Boldú // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2018. – Vol. 147. – P. 70–90.

UDC 681

LEVERAGING ADDITIVE MANUFACTURING FOR ENHANCED MINE SAFETY: A COMPARATIVE REVIEW AND EXPERIMENTAL PLAN

Marandure S. U.¹, Marandure P.²

¹ Avux Technologies, Harare, Zimbabwe

² Kwekwe Polytechnic College, Kwekwe, Zimbabwe

Abstract. This article explores using additive manufacturing (3D printing) to create rugged, custom enclosures for compact cameras in underground mining safety systems. It reviews key printing processes like Fused Filament Fabrication (FFF), Stereolithography (SLA), and Selective Laser Sintering (SLS). The research aims to improve situational awareness in the high-risk mining environment by assessing suitable printing materials and technologies to produce robust components. The study concludes by recommending an experimental plan to test the integrity and functionality of the 3D-printed enclosures to ensure they meet operational requirements.

Keywords: additive manufacturing, mining, 3D printing, surveillance, SLA, FFF and SLS.

*Address for correspondence: Marandure S, 1052, Coventry Road, Gweru
e-mail: shingirai@avuxtechnologies.com*

Introduction. Enhanced recording of situational analysis has become critical to the safety and operational efficiency of the innately high-risk underground mining environment. The implementation of visual evidence tools, such as cordless cameras, significantly improves post-event investigation, procedure verification and risk assessment. Hence, the need to document a first-hand narration of events that follows an individual's line-of-sight.

When incidents or accidents occur underground, post-event analysis has been subject to assumption, speculation and sometimes, inaccuracy. This is caused in some cases by loss of life, where the victim is no longer with us to narrate how an unfortunate incident occurred. In a bid to prevent reoccurrence of such regrettable circumstances, mining operations have established standards and procedures for each task. In addition to post-incident investigation, records of face operation would also assist in hazard identification, risk assessment and confirmation of compliance to set standards.

Literature Review. A review of recent literature highlights Additive Manufacturing (AM) as a transformative technology that liberates designers from traditional manufacturing constraints, enabling a focus on optimizing product function [1]. Researchers demonstrate the technical execution of this freedom by using topology optimization and Finite Element Analysis (FEA) to create lightweight yet robust lattice structures suitable for harsh environments [2]. This capability is critically applied in industries like aerospace, where metal AM achieves significant weight reduction and performance enhancement in complex components [3]. Ultimately, AM is framed not just as a production method but as a key strategic tool, offering a framework for businesses to achieve mass customization and gain a competitive advantage in rapidly changing markets [4].

Methodology. This methodology outlines the design of a rugged camera enclosure for the harsh mining environment, intended to be mounted on a miner's caplamp for a hands-free, line-of-sight perspective. The design must be highly durable, providing resistance to impact, abrasion, and ingress from dust and moisture (IP67). Additive Manufacturing (AM)

is selected as the production method due to its ability to create rapid, low-cost, and customized housings that can adapt to various camera and caplamp models, a flexibility that traditional manufacturing lacks. Critical design considerations include keeping the attachment lightweight to maintain ergonomic balance, ensuring the mount is secure yet convenient for quick removal, and engineering a precise lens opening to prevent optical vignetting, thus balancing robust protection with full functionality.

Review of 3D Printing Processes. This experimental plan outlines a multi-stage process to validate the camera housing design. It begins with creating a precise digital model by 3D scanning the camera and caplamp into CAD software. An initial, low-cost prototype is then 3D printed using Fused Filament Fabrication (FFF) with PETG material to test basic fit and compatibility. Following design refinements, a final, high-fidelity prototype will be professionally printed using Selective Laser Sintering (SLS) with Nylon PA12. This robust final unit will undergo rigorous functional testing, including a water submersion test to meet IP67 ingress protection standards and a formal impact test in collaboration with the National Standards Association to confirm its ruggedness for the mining environment.

Conclusion. This study focused on polymer AM processes without taking into consideration metal 3D printing due to its cost. The proof testing procedure, particularly for IP67 intrinsic safety focuses on functionality; not exploring accreditation or certification. Future work may investigate metallic filaments, partnering accredited laboratories and onsite 3D printing for mining process components. The research suggests a manufacturing process for Proof-of-Concept ready prototypes for the mining environment. It aimed to realize the full potential of Additive Manufacturing, not only for optimal functionality but also as an effective business model for rapid prototyping in customer-centric production.

References

1. Tao, W. Design of lattice structure for additive manufacturing / W. Tao, M. C. Leu // International Symposium on Flexible Automation (ISFA). – 2016. – P. 321–326.

2. Additive Manufacturing as a strategic tool for industrial competition / F. G. Sisca [et al.] // IEEE 2nd International Forum on RTSI. – 2016. – P. 1–6.

3. Metal additive manufacturing in aerospace: A review / B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden [et al.] // Materials & Design. – 2021. – Vol. 209. – Art. 110008.

4. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – 2nd ed. – New York: Springer, 2015. – 498 p.

UDC 681

AUTONOMOUS DISINFECTION ROBOT WITH ROBOTIC ARM FOR PRECISION CLEANING

Denzel C. Ndavambi¹, Kelvin Chihota¹, Doubt Simango¹, Makusha D. T.²

¹Chinhoyi University of Technology, Chinhoyi, Zimbabwe

²Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Hospital-acquired infections (HAIs) remain a major challenge to patient safety and healthcare efficiency. This project presents the design and implementation of an autonomous disinfection robot equipped with a 6-degree-of-freedom robotic arm for precision sanitization in healthcare environments. The robot integrates a LiDAR-based SLAM system for navigation, mecanum wheels for omnidirectional mobility, and an electrostatic spray system for targeted disinfection. A database-linked user interface allows authorized personnel to monitor, schedule, and control disinfection processes remotely. Simulation and prototype results confirm that the system effectively maps environments, avoids obstacles, and performs adaptive surface cleaning with minimal human intervention.

Keywords: autonomous robotics, disinfection robot, SLAM, mecanum wheels, robotic arm, hospital sanitation.

Correspondence address: Doubt Simango, Chinhoyi University of Technology

e-mail: dsimango@cut.ac.zw

Introduction. Hospital-acquired infections affect millions annually, posing serious risks to both patients and healthcare workers (CDC, 2024). Manual disinfection methods often lack consistency and fail to reach concealed surfaces. Robotics, coupled with UV-C or electrostatic disinfection, offers improved efficiency and reduced human exposure (WHO, 2020).

This project develops an autonomous robot capable of navigating hospital rooms, identifying contaminated zones, and executing targeted disinfection using an articulated robotic arm. Unlike conventional fixed-spray robots, the proposed system reaches under beds and around complex medical setups with enhanced precision.

Methodology.

1. Mechanical Design.

The mobile platform employs mecanum wheels, providing full 360° mobility for maneuvering in tight hospital spaces. A 6-DOF robotic arm, driven by Dynamixel servos, performs surface-level disinfection with accurate motion via inverse kinematics. The frame uses carbon fiber polymer for reduced weight and rigidity.

2. Sensor and Control System.

The system integrates LiDAR for obstacle detection and SLAM for real-time mapping and localization. An onboard microcontroller (Arduino Mega) manages motion planning and sensor data. A* path planning ensures optimal trajectory between rooms.

3. Disinfection System.

A diaphragm pump drives disinfectant to an electrostatic nozzle, producing uniformly charged droplets (40–80 µm) that adhere to surfaces, maximizing coverage while minimizing chemical waste.

4. Database and User Interface.

The UI allows hospital staff to log room occupancy and monitor the robot's status. The Room Status and Users tables manage disinfection scheduling and system access. Only authorized personnel can activate or halt the robot's operation, ensuring safety compliance.

Results and Discussion. Simulation and testing were performed in CoppeliaSim and MATLAB. The robot successfully generated a 3D environmental map using LiDAR and autonomously planned paths around obstacles. Inverse kinematics ensured smooth arm movement, maintaining reachability while avoiding collisions.

Trajectory control results showed minimal position and orientation errors, confirming accurate navigation. The database interface functioned effectively – automatically initiating disinfection in empty rooms and restricting access during occupancy.

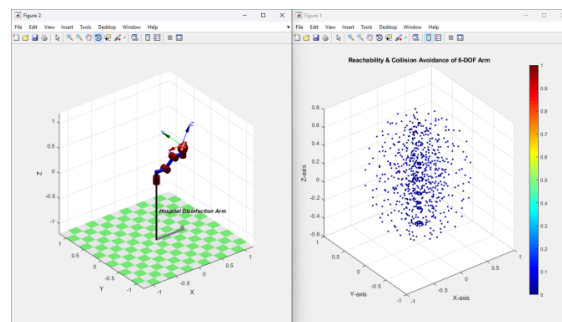


Figure 1 – Reachability and Collision Avoidance of the Robotic Arm

These outcomes demonstrate the system's potential to complement hospital cleaning operations, reduce infection transmission, and enhance sanitation efficiency through autonomous operation.

Conclusion. The autonomous disinfection robot represents a major advancement in hospital hygiene management. By combining AI-based navigation, robotic arm precision, and user-integrated control, it minimizes human exposure to pathogens and ensures consistent cleaning standards. Future work will focus on integrating AI pathogen detection and real-time environmental feedback for adaptive disinfection.

References

1. Boyce, J. M. Understanding ultraviolet light surface decontamination in hospital rooms / J. M. Boyce, C. J. Donskey // *Infection Control & Hospital Epidemiology*. – 2019. – Vol. 40, № 12. – P. 1350–1353.
2. Carling, P. C. Improving healthcare environmental cleaning and disinfection / P. C. Carling, S. S. Huang // *Infection Control & Hospital Epidemiology*. – 2013. – Vol. 34, № 5. – P. 507–513.
3. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). HAIs: Reports and Data / CDC. – Atlanta: CDC, 2024. – URL: <https://www.cdc.gov/hai/data/index.html> (date of access: 15.11.2024).
4. UV Disinfection Robots: A Review / I. Mehta, S. Patel [et al.] // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2023. – Vol. 161. – Art. 104341.
5. Ruan, K. Smart Cleaner: A New Autonomous Indoor Disinfection Robot / K. Ruan, Z. Wu, Q. Xu // *Robotics*. – 2021. – Vol. 10, № 3. – Art. 87.
6. World Health Organization (WHO). Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of COVID-19 / WHO. – Geneva: WHO, 2020. – 12 p.

UDC 681

DESIGN AND PROTOTYPING OF A LOW- COST MYOELECTRIC-CONTROLLED PROSTHETIC HAND

Muchena M., Pondani T., Amos F., Chireshe H.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Upper-limb amputations present a significant barrier to independence, especially in developing regions where advanced prosthetic technologies are either unavailable or prohibitively expensive. This project addresses that gap by designing and implementing a low-cost prosthetic hand controlled through surface electromyographic (sEMG) signals. A single Advancer Technologies Muscle Sensor v3 was used to capture electrical activity from the flexor digitorum profundus muscle in the forearm. The analog signals were processed by an ATmega328P microcontroller using real-time filtering and threshold logic to control servo motors corresponding to finger movement. A custom-assembled printed circuit board (PCB) integrated all electronic components, and the physical hand was fabricated from lightweight PVC and aluminium, ensuring low cost and mechanical durability. The final prototype demonstrated that EMG-based systems can be a practical and replicable solution for upper-limb amputees, particularly in low-resource settings such as Zimbabwe.

Keywords: prosthetics, electromyography (EMG), servo actuation, upper-limb rehabilitation, affordable assistive technology.

Correspondence address: Taurayi Pondani, Harare Institute of Technology
email: tpondani@hit.ac.zw

Introduction. Myoelectric prosthetic hands translate electrical activity from muscles into finger movements, offering improved functionality for amputees compared to conventional devices [1; 2]. Commercial systems, such as Otto Bock and Touch Bionics, achieve high accuracy but are often costly and inaccessible in low-resource settings [3]. Low-cost EMG sensors, such as the Advancer Technologies Muscle Sensor v3, provide a practical alternative for affordable prosthetic control, though they face limitations in durability and signal quality [4–6]. Implementation challenges of advanced prosthetics in regions such as Sub-Saharan Africa include cost, maintenance, and training requirements [7]. The work presents a cost-effective, single-channel EMG-controlled prosthetic hand, integrating hardware, firmware, and mechanical design to achieve basic yet reliable multi-finger motions suitable for low-resource environments.

Literature review. Prosthetic hand design has progressed from body-powered mechanical devices to myoelectric systems that use surface EMG to translate muscle activity into actuator motion [1–3]. Advances in digital signal processing and pattern

recognition have enabled proportional and more natural control, but commercial systems remain expensive and hard to maintain in low-resource settings [3; 7]. Recent work and reviews show that low-cost approaches using microcontrollers (e. g., ATmega328P) and affordable sensors (e. g., the Muscle Sensor v3) can deliver reliable, simplified control suitable for developing regions such as Zimbabwe [4–9].

System design and methodology.

A. System Overview.

The ATmega328P microcontroller acquires EMG signals from the forearm to control five servo-driven fingers. Signals are sampled, filtered, and classified into rest, partial flexion, or full flexion. Each gesture is validated across multiple readings to prevent false activation, while LEDs indicate system status.

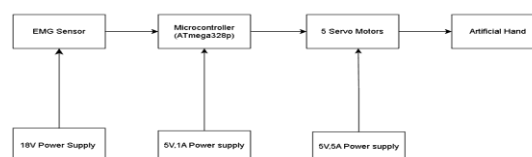


Figure 1 – Block Diagram

B. Hardware Implementation.

The system uses EMG sensor (Advancer Technologies Muscle Sensor v3), five servos, and a single-layer PCB. Power is supplied through separate batteries for logic, servos, and sensor to reduce noise. Finger motion is controlled via a tendon-mechanism using fishing lines and elastic bands.

C. Software and Firmware.

Firmware samples EMG signals, filters noise, classifies gestures, and drives servos via PWM. LEDs and serial output provide real-time feedback, and the modular code allows for future expansion.

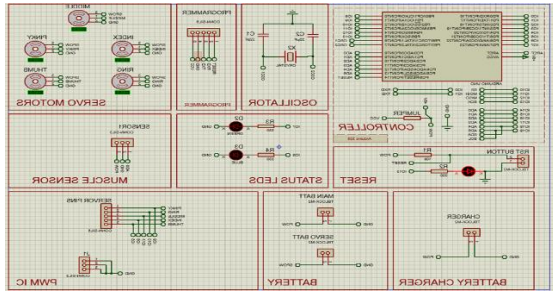


Figure 2 – PCB Fabrication

D. Simulation and PCB Design.

Proteus simulations used potentiometers to emulate EMG signals, testing servo motion and LED responses. The PCB integrated power rails, sensor inputs, and servo outputs in a compact, low-noise layout.

E. Sensor Calibration and Hand Fabrication.

EMG electrodes are placed on the forearm flexor muscles with a reference on a bony area. The hand is built from PVC and aluminum, with servos actuating nylon tendons and elastic bands restoring finger extension, ensuring modularity and low weight.

Results.

Table 1 – Prototype development and testing

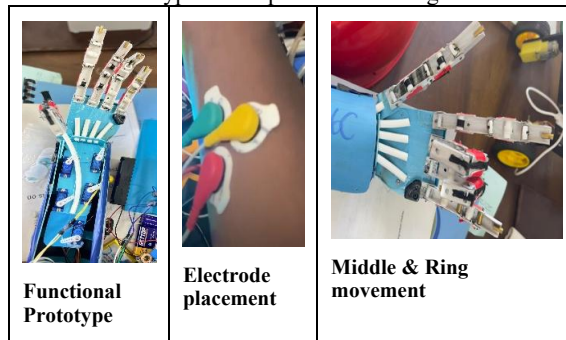


Table 2 – Motion Results

EMG Input	Detected Motion	LED Status	Servo Positions
<30	Rest	Blue	All 0°
30–70	Middle & Ring Flexion	Green	Middle & Ring 180°, Others 0
>70	Fist	Green	All 180°
Simulated noise	Filtered, stable	Appropriate LED	Accurate response

Conclusion. The project successfully in developing a low-cost, EMG-controlled prosthetic hand capable of translating forearm muscle activity into intuitive finger movements. The system demonstrated reliable signal acquisition, filtering, and classification, with servo motors accurately actuating gestures and LEDs providing real-time feedback. Simulations and hysical tests confirmed that the design is robust, responsive, and suitable for low-resource environments, providing a solid foundation for future enhancements such as additional gestures or advanced control algorithms.

References

1. Farina, A. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges / A. Farina // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2014. – Vol. 22, № 4. – P. 797–809.
2. Parker, J. Myoelectric signal processing for control of powered limb prostheses / J. Parker // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2019. – Vol. 19, № 6. – P. 923–930.
3. Commercial myoelectric prosthetic systems: Technical overview and specifications. – Zurich: International Society for Prosthetics and Orthotics, 2018. – 67 p.
4. Advanced Technologies. Muscle Sensor v3: EMG sensor user manual and specifications / Advanced Technologies. – Shanghai: Advanced Technologies, 2017. – 34 p.
5. Zhu, Z. A review of low-cost surface electromyography sensors for prosthetic control applications / Z. Zhu // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 8. – P. 2756–2768.
6. Smith, T. Field evaluation and durability testing of low-cost EMG sensors for prosthetic applications / T. Smith // BIODEVICES, Prague, 2019. – P. 112–118.
7. Zuo, J. Challenges of implementing advanced prosthetic technologies in Sub-Saharan Africa / J. Zuo // African Journal of Medical Engineering. – 2014. – № 2. – P. 45–53.
8. Kundu, D. Simulation and design of an Arduino-based EMG-controlled prosthetic arm / D. Kundu // Proceedings of the ICOSSEC, Tamil Nadu, 2020. – P. 234–240.
9. Zorzos, N. Optimized embedded algorithms for low-channel EMG signal control in prosthetic devices / N. Zorzos // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 15321–15329.

UDC 681

DESIGN AND PROTOTYPING OF A WEARABLE PATIENT MONITOR FOR HIGH DEPENDENCY UNIT (HDU)

Chinyuku L., Pondani T., Chireshe H., Ngwenya P.

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This project presents the design of a low-cost, portable 6-lead wearable ECG system for patient monitoring in High Dependency Units (HDUs). Using the AD8232 signal conditioning IC, ATmega328P for processing, and ESP8266 Wi-Fi module for wireless transmission, the system acquires six ECG leads (I, II, III, aVR,

aVL, aVF) and displays real-time waveforms on a web-based dashboard. Simulated in Proteus and implemented on hardware, the system demonstrated reliable signal acquisition and wireless transmission despite issues like motion artifacts and short battery life. The project highlights the potential of open-source hardware for affordable, real-time cardiac monitoring.

Keywords: 6-lead Wearable ECG, HDU monitoring, wireless telemetry.

Correspondence address: Taurayi Pondani, Harare Institute of Technology
e-mail: tpondani@hit.ac.zw

Introduction. Healthcare delivery in Zimbabwe faces persistent challenges, particularly in ensuring continuous monitoring of critically ill patients in High Dependency Units (HDUs) [1]. Conventional ECG systems are predominantly wired, restricting patient mobility and potentially hindering recovery, especially during cardiac rehabilitation [4]. Given that cardiovascular diseases remain among the leading causes of morbidity and mortality globally, real-time cardiac monitoring is essential for timely medical intervention [3]. This project presents the development of a low-cost, six-lead ECG monitoring system that employs four electrodes and an AD8232 module to acquire cardiac signals while maintaining patient mobility. The system wirelessly transmits ECG data to remote clinicians, facilitating continuous assessment and early detection of cardiac abnormalities [5]. By integrating compact hardware, signal processing, and web-based visualization, the proposed solution addresses the cost and accessibility limitations of conventional 12-lead ECG systems, offering a practical approach for resource-constrained HDUs.

Literature review. Electrocardiography (ECG) is essential for cardiac monitoring; however, conventional systems are often bulky, wired, and restrict patient mobility in High Dependency Units (HDUs) [1; 2]. Wearable ECG devices overcome these limitations by enabling continuous, real-time monitoring and early detection of cardiac abnormalities, thereby enhancing patient safety and recovery outcomes [3]. The AD8232 ECG module, which integrates amplification and filtering functions, facilitates high-quality biopotential signal acquisition suitable for wearable applications [5]. When combined with low-power microcontrollers such as the ATmega328P and wireless modules like the NodeMCU (ESP8266), ECG signals can be processed locally and transmitted to web-based platforms for remote visualization. Despite challenges such as signal noise, motion artifacts, and data security concerns, effective signal conditioning and robust system design can mitigate these issues. Theoretical frameworks, including Einthoven's Triangle and cardiac action potential theory, inform electrode placement and signal interpretation, supporting the development of a compact six-lead ECG system suitable for resource-limited HDUs [6]. Conditioning and system design can mitigate these issues. Theoretical frameworks, including Einthoven's Triangle and action potential theory, guide electrode placement and signal interpretation, enabling a compact, six-lead ECG system suitable for resource-limited HDUs [6].

System design and methodology.

A. System Overview.

The proposed six-lead ECG monitoring system enables continuous cardiac monitoring for High Dependency Unit (HDU) patients. It captures cardiac electrical activity using four electrodes and the AD8232 module, processes signals via the ATmega328P microcontroller, and wirelessly transmits data through the ESP8266 to a web-based interface for real-time visualization and analysis, ensuring accurate monitoring with enhanced patient mobility.

B. Hardware Implementation

The hardware integrates four electrodes placed on the right arm, left arm, left leg, and a ground on the right leg to derive six ECG leads. The AD8232 module amplifies and filters weak cardiac signals, removing baseline drift and high-frequency noise. The ATmega328P microcontroller digitizes the ECG signals, calculates augmented leads (aVR, aVL, aVF), and interfaces with the NodeMCU, which transmits data over Wi-Fi. Power is supplied via a 3.7 V lithium-ion battery, regulated to 3.3 V and 5 V as needed.

C. Software and Firmware.

The ATmega328P firmware continuously samples ECG signals via its ADC, computes additional leads algorithmically, and transmits data to the NodeMCU. The NodeMCU formats and sends the data as JSON to a web application. The web interface, built with HTML, CSS, JavaScript, and Chart.js, enables real-time visualization, lead selection, and user authentication. Error handling ensures reliability under network or hardware disruptions.

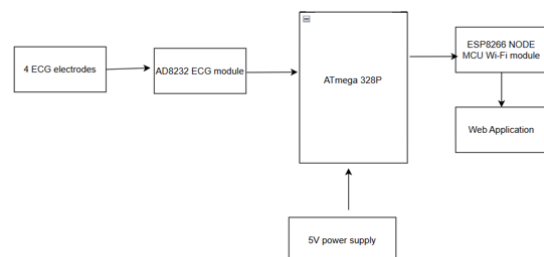


Figure 1 – Block Diagram



Figure 2 – PCB Fabrication



Figure 3 – Six Leads Display

D. PCB Design and Casing.

A custom single-layer PCB was designed using Proteus. Analog ECG input traces were separated from Wi-Fi and digital communication lines to reduce noise. The PCB was fabricated, drilled, and populated with components, ensuring proper connectivity and signal integrity. The compact casing protects electronics, provides access to connections and modules, and enhances durability and portability for clinical use.

Results.

Table 1 – Results

Parameter	Observed Result	Analysis
Lead Signal Quality	Clear P, QRS, and T waves in Leads I and II	Accurate capture of critical ECG components
Data Transmission	Real-time over Wi-Fi	Reliable with occasional brief gaps
Web Visualization	Smooth display of six leads	Effective for clinical monitoring and interpretation
Electrode Setup	3 active + 1 reference; six leads derived	Reduced hardware complexity with diagnostic accuracy

Conclusion. This project successfully developed a low-cost wearable six-lead ECG monitoring system, demonstrating practical application of biomedical engineering principles. It integrated signal processing, embedded programming, web development, and user-centered design to produce a functional, accessible solution for resource-limited healthcare settings. The system illustrates how engineering innovation can bridge clinical needs and technical feasibility. With further refinement and testing, it holds strong potential to enhance patient care and support remote cardiac monitoring.

References

1. Moyo, T. High Dependency Units in Zimbabwe: Challenges and Opportunities / T. Moyo, R. Dube, S. Sit-hole // Journal of Health Systems Research. – 2020. – Vol. 8, № 2. – P. 45–52.
2. Ngwenya, P. Patient Mobility and Cardiac Recovery in Low-Resource HDUs / P. Ngwenya, B. Chikowore, T. P. // African Journal of Clinical Care. – 2021. – Vol. 15, № 3. – P. 112–119.
3. World Health Organization (WHO). Cardiovascular Diseases: Global Status Report / WHO. – Geneva: WHO, 2021. – 245 p.
4. Chimedza, T. Innovations in ECG Monitoring for Cardiac Rehabilitation / T. Chimedza, M. Bvute // Zimbabwe Medical Journal. – 2022. – Vol. 34, № 1. – P. 22–30.
5. Grewal, H. Wearable ECG Monitoring Systems for Low-Resource Settings / H. Grewal, P. Bhardwaj // International Journal of Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 55–63.
6. Kligfield, P. Electrocardiography: Principles and Applications / P. Kligfield // Clinical Cardiology Review. – 2007. – Vol. 25, № 2. – P. 101–110.

UDC 681

DRIVER DISTRACTION DETECTION SYSTEM USING VISUAL SENSORS BASED ON DEEP LEARNING

Tendai P Nyebera, Kudzai B. Chimonyo

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. Drivers often engage in secondary activities that divert attention from driving, increasing accident risks. This study uses deep learning, specifically Squeeze Net 1.1, to detect visual and cognitive distractions through camera-based monitoring of the driver's face, hands, and body. Comparative analysis of algorithms shows ResNet offers the best accuracy. The system effectively identifies distracted driving, contributing to safer roads and advancing intelligent driver assistance technologies.

Keywords: distraction, machine learning, algorithm, deep learning, artificial neural network.

Address for correspondence: Nyebera, Harare Institute of Technology, Belvedere, Harare, Zimbabwe
e-mail: tnyebera@hit.ac.zw

Introduction. Distracted driving has become a major global safety concern, now often compared to “drinking and driving” due to its rising fatalities (World Health Organization, 2022). Each year, about 1.3 million people die in road crashes, while 20–50 million suffer non-fatal injuries, with 80–90 % of these accidents attributed to human error (OSH WIKI, 2022). Driver distraction—caused by activities like texting, eating, or loss of focus—reduces vigilance and decision-making, leading to poor hazard anticipation and accidents (ROSPA, 2017). For instance, a driver traveling at 100 km/h covers 28 meters in one

second without looking at the road, and mobile phone use increases crash risk fourfold (World Health Organization, 2022). Recognizing this threat, the United Nations launched the 2021–2030 Decade of Action for Road Safety, aiming to cut traffic accidents by 50% by 2030. In line with this initiative, the study seeks to develop a real-time driver distraction detection system for embedded devices using SqueezeNet 1.1, a lightweight convolutional neural network (CNN). The system continuously monitors driver behaviour, detects distractions, and issues alerts to help drivers refocus, reducing accident risks.

The study's main objectives are to enhance detection accuracy, implement a real-time CNN-based detection system using SqueezeNet 1.1, and design an alarm mechanism to warn distracted drivers. By leveraging machine learning and artificial intelligence, the model identifies behavioural patterns and correlations to support accurate decision-making. Through intelligent monitoring and timely alerts, the proposed system aligns with the UN's global road safety targets, helping lower accident rates and promote responsible driving practices (Sahoo et al., 2022).

Research Method and Design. This study presents the development of a real-time driver distraction detection system using SqueezeNet 1.1, a compact convolutional neural network (CNN) optimized for embedded and mobile devices. The methodology involves data collection, annotation, model training, hyperparameter tuning, and performance evaluation to enhance detection accuracy. An annotated dataset representing various driver attention states is used to train SqueezeNet 1.1 to distinguish between distracted and undistracted driving behaviours. The model's hyperparameters are adjusted to maximize performance after training using the training set. The validation set keeps track of the model's performance throughout training to guarantee its effectiveness. Three methods are used to increase SqueezeNet 1.1's accuracy. By applying transformations and producing additional training data, data augmentation is used to broaden the diversity of the training dataset. To adapt pre-trained models to the task of detecting driver distraction, transfer learning is used. Ensembling techniques combine the output of multiple models to improve the system's accuracy further. The final trained model enables real-time distraction detection on embedded systems, contributing to improved road safety.

AttenD Algorithm to Determine Driver Distraction. The AttenD algorithm assesses a driver's ability to shift attention while maintaining focus within the Field Relevant for Driving (FRD). It assumes the driver's gaze is directed toward essential areas like mirrors and the speedometer. When gaze tracking fails, it relies on head tracking, defining the FRD as a 90° cone angled 22.5° downward. If tracking data is lost, a buffer, based on head direction is used to estimate attention; this buffer decreases when the head deviates significantly from the forward direction, signalling distraction. By integrating SqueezeNet 1.1, VGG-16, ResNet50, MobileNetV2, and the AttenD algorithm, the study establishes a robust real-time driver distraction detection system capable of accurately identifying and mitigating distractions to enhance road safety and prevent accidents.

Results and Discussion. The experiments carried out to verify the accuracy of the pictures taken by the driver detection system are discussed, and their findings are presented in this section. A dataset comprising 4,000–6,000 images evenly distributed across ten driver behaviour categories was utilised. Of this dataset, 80 % was allocated for training and 20 % for validation and testing. Data collection considered factors such as camera placement, resolution, frame rate,

lighting conditions, labelling accuracy, data storage, privacy compliance, diversity, and quality. The dataset, developed by (Abouelnaga et al. 2017), includes ten distinct driver postures and behaviours used to train and validate the proposed model effectively.

Validation of Images Taken In the Driver Detection System. The validation process for the driver distraction detection system involves data labelling, cleaning, feature extraction, model training, and real-world testing. High-quality and diverse labelled data are essential for achieving accurate detection results, and compliance with privacy regulations and driver consent is mandatory. Each video sample is labelled with relevant details such as the type of distraction or driving behaviour. Features linked to distracted driving are extracted from the labelled data to train a machine learning model, which is evaluated using accuracy, precision, recall, and F1-score metrics on a separate test set. Before training, images undergo pre-processing steps like rotation, scaling, and resizing from 640×480 to 224×224 , with pixel RGB normalization applied. In the final stage, the validated system is tested under real traffic conditions to assess its performance and reliability.

Comparison of the Models. Table 1 presents the average model accuracy obtained for each model during training and testing. According to the table, MobileNetV2 achieved the highest training and testing accuracies, indicating superior performance compared to VGG-16 and ResNet50.

Table 1

Model	Training Acc	Training Loss	Testing Acc	Testing Loss
VGG - 16	97.08	0.0016	94.02	0.0361
Resnet50	97.92	0.0882	94.28	0.2572
MobileNetV2	99.98	0.0034	98.13	0.0936

The results display the effectiveness of the distinctive models in correctly classifying driver distraction behaviour. MobileNetV2 suggests the best accuracy, suggesting its suitability for low-resource mobile and embedded imaginative and prescient packages, while VGG-sixteen and ResNet50 additionally exhibit overall quality performance. These findings contribute to developing robust driver distraction detection structures, enhancing street protection, and preventing injuries.

Conclusion. This paper gives AttenD, a distraction detection system that utilizes an attention set of rules, lane departure, and deep mastering architectures, including MobileNetV2, VGG-16, and ResNet. The system considers several variables to accurately hit upon driving force distraction. Tests conducted on an assisted-driving testbed demonstrate that ResNet50 and MobileNetV2 attain advanced accuracy, with 94.28 % and 98.13 %, respectively. The proposed method outperforms standard approaches in terms of performance. In real-time implementation on a Jetson TX1 embedded computer board, the system achieves accuracy between 86 % and 92 % and operates at a frequency range of 8 to 14 Hz.

References

1. Abouelnaga, Y. Real-time distracted driver posture classification / Y. Abouelnaga, H. M. Eraqi, M. N. Moustafa // arXiv. – 2017. – arXiv:1706.09498.
2. Driver Distraction Identification with an Ensemble of Convolutional Neural Networks / H. M. Eraqi [et al.] // Journal of Advanced Transportation. – 2019. – Vol. 2019. – Art. 9512836.
3. Sahoo, G. K. A Deep Learning-Based Distracted Driving Detection Solution Implemented on Embedded System / G. K. Sahoo, S. K. Das, P. Singh // Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Image Processing. – 2022. – P. 345–356.
4. Natarajan, P. Spatio-Temporal Attention Models for Driver Distraction Detection / P. Natarajan, P. Moulin // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2020. – P. 1523–1528.

UDC 681

DYNAMIC PHASE ANGLE AND DEAD-TIME COMPENSATION FOR HIGH-EFFICIENCY DUAL ACTIVE BRIDGE CONVERTERS

Palmer Dhlwayo¹, Musiwa P. B.¹, Kapuya E. T.², Musadamba D.³¹Harare Institute of Technology²University of Zimbabwe³Chinhoyi University of Technology
Harare, Zimbabwe

Abstract. Dual Active Bridge (DAB) DC-DC converters have emerged as a critical technology in high-power applications requiring bidirectional energy transfer and galvanic isolation, particularly in electric vehicle (EV) charging systems and renewable energy integration. The research demonstrates that intelligent dead time management significantly reduces switching losses while maintaining zero-voltage switching characteristics, addressing a critical challenge in high-frequency SiC-based DAB implementations.

Keywords: dual active bridge, DC-DC converters, phase angle modulation, dead time optimization, digital signal controllers, silicon carbide MOSFETs, electric vehicle charging, bidirectional power flow.

Address for correspondence: Musiwa P. B., Harare Institute of Technology

e-mail: hit@hit.ac.zw

Introduction. The fundamental operation of a DAB converter involves two active H-bridges interconnected through a high-frequency transformer and a series inductor. Power transfer is primarily regulated through phase shift modulation between the two bridges. In contrast, the dead time between complementary switches within each bridge is crucial for preventing shoot-through conditions and ensuring soft switching operation.

The adoption of wide bandgap semiconductors, particularly Silicon Carbide (SiC) MOSFETs, has enabled significant performance improvements in DAB implementations. Modern DAB demonstrations, such as Microchip's 11 kW platform, leverage these devices to achieve remarkable efficiency levels of 98.5 % at switching frequencies of 100 kHz.

Literature Review & Research Gaps.

1. Current State of DAB Research.

Recent research in DAB converters has primarily focused on modulation techniques and performance optimization strategies. The conventional Single-Phase Shift (SPS) modulation remains widely adopted due to its implementation simplicity, but suffers from reactive power circulation and limited soft-switching range, particularly under light-load conditions. In response, researchers have developed advanced modulation strategies, including Dual Phase Shift (DPS), Extended Phase Shift (EPS), and Triangular Modulation schemes that provide additional control degrees of freedom.

2. Identified Research Gaps

Despite substantial progress in DAB research, several significant gaps remain unaddressed in current literature:

Limited Research on Combined Phase Angle and Dead Time Optimization.

Inadequate Adaptive Dead Time Strategies for Wide Operating Ranges.

Limited Practical Implementation Studies Using Digital Control Platforms.

Problem Statement. This research aims to develop and validate an integrated optimization methodology that simultaneously addresses phase angle modulation and dead time control using modern digital signal processing capabilities, with specific focus on maintaining high efficiency across the entire operational range of high-power DAB converters.

Methodology.

1. Experimental Setup and System Architecture

To address the research problems, a comprehensive testing and validation methodology based on Microchip's 11 kW DAB demonstration platform was developed. The system architecture, incorporates the following key components:

PIC33CK512MP608 Digital Signal Controller: This 100 MHz single-core DSC serves as the primary control processor, implementing the phase shift modulation algorithms and adaptive dead time control strategies.

SiC MOSFET Power Stage: Utilizing 1700 V, 750 mΩ silicon carbide MOSFETs in a dual active bridge configuration, capable of operating at switching frequencies up to 100 kHz.

Gate Driver Circuitry: Isolated gate drivers with programmable dead time capability, enabling precise switching transition control.

Measurement and Sensing Systems: High-precision current and voltage sensors are used to monitor

input/output characteristics, inductor current, and switching node behavior.

Table 1 – System Specifications of the 11kW DAB Demonstration Platform

Parameter	Min	Typical	Max	Units	Conditions
Input Voltage	700	–	900	VDC	–
Output Power	–	–	11	kW	–
Switching Frequency	–	100	–	kHz	–
Efficiency	–	98.5	–	%	–
Galvanic Isolation	4	–	–	kV	–
Ambient Operating Temperature	0	–	50	°C	–

Results and Discussion

1. Efficiency Measurements Across Operating Range.

Implementing optimized phase angle control and adaptive dead time strategies resulted in significant efficiency improvements across the operational range, particularly at light-load conditions where conventional DAB implementations typically exhibit substantial performance degradation.

The data demonstrates that the optimized adaptive control strategy provides particularly significant benefits at light-load conditions, where efficiency improvements exceeding 2.2 % were achieved. This improvement is primarily attributed to reduced reactive power circulation through optimized phase angle control and the minimization of switching losses through adaptive dead time compensation.

Table 2 – Efficiency Measurements at Different Load Conditions

Load Condition	Input Voltage (V)	Conventional SPS (%)	Optimized Adaptive Control (%)	Improvement
Light Load (20 %)	700	94.2	96.5	+2.3 %
Medium Load (50 %)	700	97.1	98.2	+1.1 %
Heavy Load (100 %)	700	98.3	98.5	+0.2 %
Light Load (20 %)	800	94.5	96.7	+2.2 %
Heavy Load (100 %)	800	98.4	98.6	+0.2 %

UDC 681

PHASE ANGLE AND DEAD TIME IN DUAL ACTIVE BRIDGE DESIGNS FOR ELECTRIC VEHICLES AND SOLAR CHARGE INVERTERS

Nyambayo T. C.¹, Musiiwa P. B.¹, Kapuya E.T.¹, Musademba D.²

¹Harare Institute of Technology

²Chinhoyi University of Technology
Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper presents a detailed analytical and simulation centered study of two widely used timing methods / controls in the implementation of Dual Active Bridge (DAB), that is Dead Time and Phase Angle. In this research paper, we will delve deeper into trying to have a well-informed understanding on the impact and relationship between the switching times experienced during the Phase Angle (phase shift) and the Dead Time against the

2. Thermal Performance and Switching Characteristics.

Thermal measurements revealed substantial improvements in device temperatures, particularly for the SiC MOSFETs in the primary bridge where switching losses dominate. At 50 % load condition with an input voltage of 800 V, the peak device temperature was reduced from 78 °C to 68 °C, representing a 12.8 % reduction in temperature rise. This improvement correlates with the extended lifetime expectation of power semiconductor devices, as every 10 °C reduction in operating temperature typically doubles device lifetime.

3 Dynamic Response and Mode Transition.

The dynamic response of the DAB converter with optimized control parameters was evaluated through load step changes and input voltage variations. The results demonstrated that the adaptive control strategy maintained stability and performance during transitions, with the system successfully identifying operational mode changes and applying appropriate control parameters.

Conclusion. This research has demonstrated the significant performance benefits achievable through coordinated optimization of phase angle control and dead time management in Dual Active Bridge DC-DC converters.

Several promising directions emerge from this work for future research. First, extending the optimization methodology to multilevel DAB topologies would leverage the additional degrees of freedom available in these architectures for further performance improvements. Second, developing machine learning-based optimization approaches could enhance the adaptability and robustness of the control strategies across varying operating conditions and component aging.

References

1. Microchip Technology Inc. 11kW Dual Active Bridge DC-DC Demonstration Application / Microchip Technology Inc. – Chandler: Microchip Technology Inc., 2023. – 45 p.
2. Comparative analysis of dual active bridge dc-dc converter employing Si, SiC and GaN MOSFETs for G2V and V2G operation / R. K. Sharma [et al.] // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 1011–1019.
3. A Novel Mathematical Approach for Inductor-Current Expressions Definition in Multilevel Dual-Active-Bridge Converters / J. M. Garcia, L. F. Costa, M. R. Silva [et al.] // Electronics. – 2024. – Vol. 13, № 22. – Art. 4476.

resultant inverter efficient, converter soft switching behavior and finally the output voltage wave form. To come up with a first-hand experience, MATLAB / Simulink models of the said relationship is going to be examined. In conclusion, the results obtained through the conduction of simulations, demonstrates and clearly shows that by optimizing the Phase Angle and the Dead Time in DAB, this greatly improves the performance and efficiency of end user products such as EV's and Inverter charging systems when subjected to varying load conditions during operations.

Keywords: DAB converters, dead-time, phase angle, electrical vehicle (EV's).

Address for correspondence: 10116 Glen View 7, Harare, Zimbabwe

e-mail: h240625a@hit.ac.zw

Introduction and Methodology. The Dual Active Bridge (DAB) converter is a bidirectional isolated DC–DC converter widely adopted in (EV's) Electric Vehicle charging stations, Vehicle-to-Grid (V2G) systems, and Photovoltaic (PV) charge inverters and generators. It consists of two active full-bridges separated by a high-frequency transformer. The control of switching sequences, particularly phase angle and dead time, is essential for achieving: (Placeholder1) Soft switching, minimizing losses and ensuring robust bidirectional power transfer. To conduct the research study, MATLAB / Simulink is going to be used to imitate the given field parameters 380 V feed / input voltage, 24 V output secondary voltage, 100 kHz switching frequency and a transformer ratio of 16:1. The methodology deployed to analyze these two switching timings were slightly different and varied, this made it easy to analyze their performance.

Dead Time. It is a tiny pause which a system goes before switching to another. The real effect being that the system does not (Short / Clap), which in turn leads to protection of switches, and improve efficiency. A simple analogy can be used to further simplify the Dead Time. Let's say two kids are pushing on a swing or a see saw. Suppose the two kids take turns to propel the See Saw in a back-and-forth motion, before either one of the kids take charge of the swing (change direction), a Momentary Safety Pause is experienced so that they do not crash. This Safety Pause (Mental Picture) is the one referred to as the Dead Time. In Power Electronics, Dual Active Bridge (DAB) uses the same phenomenon as highlighted above, to rapidly switch Transistors On / Off, and when an occurrence happens that two Switches (Transistors) on the same leg are On at once, they Short (get worn-out by Clapping). To avoid Transistor Short and reduced efficiency, engineers introduce a Safety Pause between Transistor switching known as the Dead Time. However, non-ideal dead time leads to distorted waveforms, reduced zero-voltage switching (ZVS) margin, increased circulating currents and decreased converter efficiency. (Deqiang Wang, Fei Peng, Jin Ye, Yinye Yang, Ali Emadi, 2017) (Subhapriyo Joarder, Arnab Ghosh, Subrata Banerjee, Chiranjit Sain, Furkan Ahmad, 2024).

Phase Angle. In simple terms Phase Angle can be defined as How far apart the two opposing transistors pushes are to each. The greater the Phase Angle, the bigger the Power Transfer. A mental picture that can easily relate to the occurrence of the Phase Angle is the power knob, where there is a direct correlation between the Phase Angle and power knob. By altering

the polarity of the Phase Angle, power flows in an opposite direction. The Phase Angle can also be used to Source or Sink power in Dual Active Bridge (DAB). (Chaochao Song, Alian Chen, Yiwei Pan, Chunshui, Chenghui Zhang, 2019).

Challenges at High Power and Frequency.

Phase Angle and Dead Time are some of the critical timing choices widely deployed and implemented in Dual Active Bridge switching of Transistors. With the advent of high-performance electronic devices, equipment and gadgets e. g. (EV's) Electrical Vehicles, Photovoltaic Inverters and Generators etc. a troubling experience is witnessed when these timing choices are put to the test, under High Power, High Switching Frequencies and Speed, Wide Input and Output Voltage Ranges. The real-world problems being experienced by subjecting the Dual Active Bridge to High Switching Frequencies and Speed, and High Power include: (Juan A. Santiago-González, David M. Otten, David J. Perreault) (Chaochao Song, Alian Chen, Yiwei Pan, Chunshui Du, Chenghui Zhang, 2019) Loss of efficiency, Weird DC offset and flux bias in the transformer, Electromagnetic Interference (EMI), Failed Soft-switching, Excess heat generated, and Control instability.

Performance analysis of DAB Converters. Plotting the results of phase shift against normalized power transfer creates a sinusoidal graph. This representation shows that as the phase angle increases from 0° to 45°, power transfer rises, reaching its maximum peak at the 45° apex. Once the phase angle surpasses 45°, the power transfer begins to gradually diminish until it reaches the 90° angle.

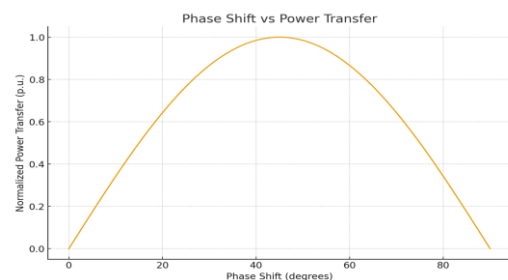


Figure 1

Interpretations. A sinusoidal graphical representation highlights the direct correlation between phase shift and power flow in a Dual Active Bridge, with maximum active power transfer occurring at a 45° angle. When the phase angle exceeds 45°, phase misalignment begins, resulting in reduced power flow and a potential loss of Zero Voltage Switching (ZVS).

Dead Time vs Efficiency. The efficiency of Dual Active Bridge increases the efficiency of a Dual Active Bridge is optimized when the dead time is approximately 1.5 microseconds, as efficiency begins to diminish once the dead time reaches 1.8 microseconds. For optimal performance, the dead time must be carefully managed, ensuring it is not too short (< 1.25 ms) nor too long (> 1.85 ms), as either extreme can negatively impact efficiency.

Interpretation. Dead time is a vital parameter for achieving Zero Voltage Switching (ZVS), as it allows transistors to switch without voltage overlap, thereby minimizing or reducing switching losses. An incorrect dead time duration compromises efficiency; too little dead time can cause hard switching, higher losses, and stress on components like MOSFETs or IGBTs. Conversely, prolonging the dead time also reduces efficiency by creating longer non-conducting intervals, current distortion, and a reduced effective duty cycle.



Figure 2

Results and Conclusion. From the results obtained, the simulation findings highlight that when the Dead Time ranges between 1.25–1.85 microseconds, the DAB maintains an optimum Zero Voltage Switching (ZVS). The performance of the DAB is also seen to be at its optimum levels (above 95 % of the normalised power peak transfer) when the Phase Angle is within the range (40° – 46°) degrees. The experiment confirms that by tuning the Phase Shift and the Dead Time to its optimal levels, will result in optimized performance of the Dual Active Bridge (DAB). The Phase Shift in essence ensures efficient Power Modulation and Direct Control whilst the Dead Time – it improves high efficiency through loss reduction and Zero Voltage Switching (ZVS).

References

1. Song, C. Modeling and Optimization of Dual Active Bridge DC-DC Converter with Dead-Time Effect under Triple-Phase-Shift Control / C. Song, A. Chen, Y. Pan, C. Du, C. Zhang // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 6. – Art. 973.
2. Wang, D. Dead-time effect analysis of a three-phase dual-active bridge DC/DC converter / D. Wang, F. Peng, J. Ye, Y. Yang, A. Emadi // *IET Power Electronics*. – 2017. – Vol. 11, № 6. – P. 1099–1108.
3. Santiago-González, J. A. Light Load Efficiency Improvements in Dual Active Bridge Converters via Dead time Control / J. A. Santiago-González, D. M. Otten, D. J. Perreault // 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). – 2018. – P. 1–6.
4. Joarder, S. Harmonic modelling and control of dual active bridge converter for DC microgrid applications / S. Joarder, A. Ghosh, S. Banerjee, C. Sain, F. Ahmad // *Energy Reports*. – 2024. – Vol. 12. – P. 52–74.

UDC 681

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIRECTIONAL FORCE TRANSMISSIBILITY AND MEASUREMENT ACCURACY IN FORCE-TRANSDUCER-BASED DYNAMOMETER SYSTEMS UNDER RANDOM EXCITATION

Munyaradzi Innocent Mupona, Mutsa Chirasha

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. This paper presents an experimental examination into the directional force transmissibility and measurement accuracy of a force-transducer-based dynamometer under random excitation. The primary goal is to determine how input and output forces are transmitted through the dynamometer structure in both longitudinal and transverse directions over a large frequency range. The experimental setup consisted of an octagonal-ring dynamometer equipped with five piezoelectric force transducers type 8230-003. Four sensors were attached on the dynamometer rings, with a fifth transducer placed along the string that connects the shaker and the dynamometer to receive input excitation. Random excitation signals were delivered within a frequency range of 0–1600 Hz, and the dynamic response was recorded in the frequency domain to compute the transmissibility coefficient.

Keywords: transmissibility, dynamometer, data acquisition, transducer, calibration.

Address for correspondence: Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe
e-mail: hit@hit.ac.zw

Introduction. Dynamometers are widely used in engineering applications to measure torque, force, and power in mechanical systems, particularly in engine testing, material characterization, and vibration analysis. Recent research has emphasized vibration isolation, signal conditioning, and calibration methods for improving dynamometer precision. This work, which aims to experimentally determine how

the transmissibility coefficient varies with direction and frequency, and how these variations influence measurement accuracy. The dynamometer under study was developed by Mupona et al. as described in the article ‘Modal analysis of a milling dynamometer considered as 1DOF system’ (*Vibroengineering Procedia*, 2022), which provides the foundation for the system’s design and measurement configuration

adopted in this research [1]. The fundamental principle relies on measuring the elastic deformation of a sensing element, which is linearly related to the applied force via calibrated transducers. A significant body of research has been dedicated to the design and static calibration of dynamometers, ensuring high accuracy under quasi-static loading conditions [2, 3]. However, the assumption that a statically calibrated dynamometer performs accurately under dynamic excitation is often invalid. The dynamometer's structure is not infinitely rigid; it possesses its own mass, stiffness, and damping characteristics, causing it to behave as a multi-degree-of-freedom (MDOF) mechanical system when subjected to dynamic loads. This dynamic behaviour leads to phenomena such as resonance and mechanical cross-talk, which can severely distort force measurements [4, 5]. The concept of force transmissibility is critical in this context. While traditionally used in vibration isolation to describe the transmission of motion from a base to a mass, it is directly analogous to the transmission of force through a measuring instrument [6]. The transmissibility function defines the relationship between the input force applied to the dynamometer and the output force measured by its transducers as a function of frequency. An ideal dynamometer would have a transmissibility magnitude of unity and a phase of zero across all frequencies, implying perfect measurement fidelity. In reality, the transmissibility deviates significantly near and past the system's natural frequencies, leading to amplified or attenuated measurements [7]. While valuable, harmonic testing may not fully reveal the system's behaviour under more realistic, broad-spectrum loading conditions, such as those encountered in machining or impact events. Random excitation, by contrast, excites all frequencies within a band simultaneously, providing a more robust and representative characterization of the dynamometer's performance in practical operational environments [8]. A key challenge, and the focus of this work, is the directional nature of force transmissibility. The complex geometry of dynamometers, such as the octagonal-ring design, means that forces are not transmitted isotopically. A force applied in the longitudinal (primary) direction can induce significant responses in the transverse directions due to cross-talk, and vice-versa [9]. Furthermore, the mounting and interfacing of the dynamometer with the excitation source (e. g., a shaker through a stinger) introduce additional dynamic elements that can influence the measured force. The use of a separate transducer to measure the input force, as proposed in this study, is a recognized method to decouple the dynamometer's response from the exciter's characteristics, allowing for a direct measurement of the dynamometer's intrinsic transmissibility [10]. While the static calibration and cross-talk compensation of dynamometers are well-established, a comprehensive experimental investigation of their directional force transmissibility under random excitation over a large frequency range (0–1600 Hz) remains a less explored area. Most

studies focus on the operational frequency range well below the first natural frequency. This research aims to fill this gap by experimentally quantifying how input forces are transmitted and distorted in both longitudinal and transverse directions, thereby providing a foundational understanding of the measurement accuracy limits of force-transducer-based dynamometer systems under dynamic conditions.

Experimental Setup. The experimental investigation was conducted using a setup comprising three integrated subsystems to characterize the directional force transmissibility of the dynamometer as in fig. 1. The core of the setup was an octagonal-ring dynamometer, instrumented with five piezoelectric force transducers (Type 8230-003). Four of these sensors were mounted on the dynamometer rings at 90° intervals to capture the transmitted output forces along different axes, while a fifth transducer was placed in series along the stinger connecting an electromagnetic shaker to the dynamometer to directly measure the input excitation force, $F_{in}(\omega)$. The excitation system applied a controlled broadband random signal in the frequency range of 0–1600 Hz to probe the system's dynamic response across a wide spectrum. The dynamic signals from all five transducers were simultaneously captured by a high-speed data acquisition system. The time-domain data were then processed using Fast Fourier Transform (FFT)-based spectral methods to determine the output force, $F_{out}(\omega)$, from the dynamometer's sensors, enabling the subsequent computation of the transmissibility coefficient in the frequency domain as the ratio $F_{out}(\omega)/F_{in}(\omega)$.

Methodology. The methodology commenced with the system assembly and calibration of the piezoelectric transducers. Experimentation proceeded by applying controlled random excitation sequentially along the dynamometer's longitudinal and primary transverse axes. For each directional test, the time-domain signals from the input and all output force transducers were simultaneously recorded. Data was processed in the frequency domain using FFT-based spectral analysis to compute the force transmissibility functions, defined as the ratio of output to input force spectra. This allowed for the primary characterization of force transmission and the quantitative evaluation of dynamic cross-talk by analysing the response in orthogonal directions. Finally, measurement validity was confirmed using the coherence function, ensuring data quality and linearity across the 0–1600 Hz frequency range.



Figure 1 – Modal test of dynamometer using shaker input signal in longitudinal direction

Conclusion. The transmissibility results obtained under random vibration excitation (0–1600 Hz) revealed a generally low transmission ratio, with all values remaining below unity. This confirms that the system effectively attenuates dynamic forces rather than amplifying them. Notably, 17 discrete frequencies exhibited close agreement between longitudinal and transversal transmissibility, implying near-isotropic dynamic behavior at those points. These frequencies likely represent common structural response modes where energy distribution is balanced between directions. Beyond these points, differences between the two directions became more pronounced, reflecting the inherent anisotropy of the dynamometer and mounting configuration. Overall, the results provide a strong experimental basis for developing a transmissibility law characterizing the directional dependence of vibration transmission within the system.

References

1. Mupona, M. I. Modal analysis of a milling dynamometer considered as 1DOF system / M. I. Mupona, I. C. Roşca // *Vibroengineering Procedia*. – 2022. – Vol. 46. – P. 54–60.
2. Kim, D. H. A design and calibration of a three-component dynamometer for milling process / D. H. Kim, C. M. Lee // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28, № 1. – P. 4–12.
3. Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque / S. Yaldiz [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2007. – № 1. – P. 3–22.
4. Park, S. S. Dynamic compensation of spindle-integrated force sensors / S. S. Park, Y. Altintas // *CIRP Annals*. – 2004. – Vol. 53, № 1. – P. 305–308.
5. A methodology for the dynamic calibration of force transducers / A. Mondelin [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2012. – Vol. 26. – P. 1–16.
6. Inman, D. J. *Engineering Vibration* / D. J. Inman. – 4th ed. – London: Pearson, 2014. – 688 p.
7. Stein, G. J. On the dynamic behavior of force transducers / G. J. Stein, P. Mucka // *Measurement*. – 2005. – Vol. 38, № 3. – P. 183–196.
8. Bendat, J. S. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures* / J. S. Bendat, A. G. Piersol. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2010. – 640 p.
9. Pereira, J. M. Evaluation of the cross-talk in a three-component force dynamometer / J. M. Pereira, M. F. S. F. de Moura // *Experimental Mechanics*. – 2005. – Vol. 45, № 5. – P. 1–8.
10. Yoshioka, T. A method for the dynamic calibration of force transducers using a vibration exciter / T. Yoshioka, Y. Yabe // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – Vol. 22, № 5. – Art. 055101.
11. Design of a Quality Management System to enhance reliability in Remote Monitoring with Control for ZETDC Bulk Supply points DC Supplies focusing on Telecommunications and Protection DC systems.

UDC 681

DESIGN OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM TO ENHANCE RELIABILITY IN REMOTE MONITORING WITH CONTROL FOR ZETDC BULK SUPPLY POINTS DC SUPPLIES FOCUSING ON TELECOMMUNICATIONS AND PROTECTION DC SYSTEMS

Patson Ngoshi, Kudzai Chimonyo

Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe

Abstract. High voltage substations depend heavily on reliable DC power supplies to ensure the continuous operation of protection relays, telecommunications systems, and control equipment. This paper presents the design of a Quality Management System (QMS) aimed at remotely monitoring and controlling these DC supply systems, with particular emphasis on battery banks and chargers supporting telecom and protection infrastructure. The proposed system ensures compliance with reliability standards, enhances real-time visibility, and enables predictive maintenance, thereby improving operational efficiency and system resilience. A new standard by the international Electro technical commission (IEC) which is IEC 61850 communication system in substations which is primarily used to eliminate the problem of interoperability between IEDs supplied by different vendors. Currently existing systems used only give an indication of a failure of DC supplies but do not offer ways to control the DC supply system so that it functions well. This paper looks into that and also proposes a way to monitor and control the DC supply system.

Keywords: quality management system, remote monitoring, protection systems, telecommunication batteries, battery chargers, predictive maintenance.

Address for correspondence: Harare Institute of Technology, Harare, Zimbabwe
e-mail: hit@hit.ac.zw

Introduction. Modern power systems rely on high voltage substations for the transmission and distribution of electricity. Within these substations, reliable DC power is essential to maintain critical systems such as protection relays, automation equipment, and telecommunications. Failure in DC supply systems can lead to malfunctions in protection schemes, delayed fault clearing, or even blackouts.

Therefore, ensuring the health and reliability of batteries and chargers in substations is a matter of significant operational importance.

Substation DC systems generally include:

Battery banks (typically VRLA or Ni-Cd types),
Battery chargers (rectifiers with float and boost charging), Distribution panels with circuit breakers and monitoring devices and Remote Terminal Units (RTUs) or intelligent electronic devices (IEDs).

The proposed system architecture shall include:

Sensors and IEDs to monitor voltage, current, temperature, electrolyte levels, and charger output.

Data Acquisition Units (DAUs) integrated with existing RTUs or PLCs. Communication Interfaces using secure protocols (e.g., IEC 61850, DNP3, Modbus TCP/IP). Cloud or Local Server Platforms for data storage and visualization. User Interface Dashboards for operators and maintenance personnel.

Alarm and Event Management System integrated with the SCADA/HMI. The SCADA system shall also be used for quality control of the system ensuring that it performs as intended.

Design of the Quality Management System (QMS). Quality Objectives. Ensure battery voltage and temperature within specified limits. Maintain charger output regulation and health. Early detection of battery degradation (for example sulfation, cell imbalance). Timely alarm on low charge/discharge events.

Key Features. Automated Reporting on battery state of health (SoH) and state of charge (SoC). Trend Analysis of parameters to forecast maintenance. Alarm Hierarchies based on severity. Self-test Routines scheduled to minimize false alarms.

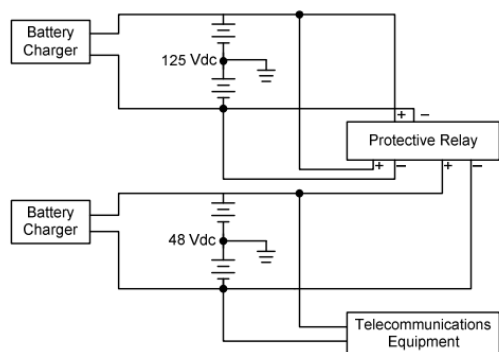


Figure 1 – DC supply system in a substation

Implementation and Monitoring.

Implementation. Implementation and monitoring will include, Baseline Survey of existing equipment, Gap Analysis to determine integration needs. Selection of Remote Monitoring Devices compatible with substation standards. System Integration Testing with existing SCADA/EMS platforms. Staff Training and procedure development, Deployment and Commissioning and Ongoing monitoring includes real-time dashboards, monthly performance reports, and quarterly audits. AI-powered analytics may be employed for anomaly detection and lifecycle prediction.

There are various benefits of this system which include improving uptime of protection and telecom systems. Data-driven maintenance and lifecycle management. Enhanced safety through early fault detection.

Disadvantages are also found in such systems and these include Integration with legacy systems.

Cybersecurity concerns with remote access.

Initial capital cost and training requirements.

DC Battery Systems. The dc auxiliary service of a substation is responsible for supplying dc current

for all devices. It is composed basically of a rectifier, a battery charger, and a bank of batteries for each level of dc voltage required. The proper operation of the dc battery system and the source of ac is essential for the operation of the control and protection systems of a substation. However, not all the rectifiers and battery chargers have auto diagnostic mechanisms, and those that have them only signal to indicate alarm situations.

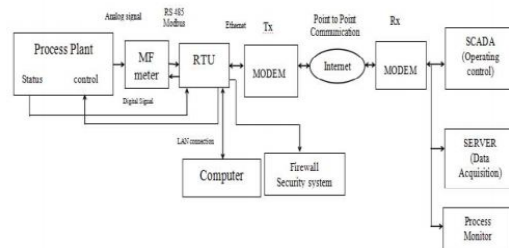


Figure 2 – Remote monitoring system for a substation

Quality control. This shall be achieved through ensuring system design meets IEC standards, SCADA operator training, designing user friendly HMI, simulation of the system before testing it in the real world, design drawings shall be reviewed including program flow charts and system back up archived. Access control and cybersecurity protocols shall also be implemented for system protection from unauthorized users.

References

1. Kimura, S. Applying IEC 61850 to Real Life: Modernization Project for 30 Electrical Substations / S. Kimura, A. Rotta, R. Abboud [et al.] // Proceedings of the 10th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 2008. – 2008. – P. 1–12.
2. Ayers, L. Using Dynamic Real-Time Substation Information to Reinvent Asset Management / L. Ayers, D. Dolezilek // Proceedings of the 3rd Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 2001. – 2001. – P. 1–8.
3. Dolezilek, D. Understanding, Predicting, and Enhancing the Power System Through Equipment Monitoring and Analysis / D. Dolezilek // Proceedings of the 2nd Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 2000. – 2000. – P. 1–7.
4. Bernardes, R. PQMS – Power Quality Monitoring System: Improve Power Systems Through IEDs / R. Bernardes, F. Ayello // Proceedings of the 20th Annual International Conference on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic, June 2009. – 2009. – P. 1–6.
5. Sidhu, T. S. Implementation Issues with IEC 61850 based substation automation systems / T. S. Sidhu, M. G. Kanabar, P. P. Parikh // National Power Systems Conference, Bombay, December 2008. – 2008. – P. 473–478.
6. Li, H. Research on technologies in smart substation / H. Li, K. Wang // ICSGCE 2011: Energy Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 113–119.
7. Satheyamoorthy, K. P. Role of controlling of substation using PLC and SCADA / K. P. Satheyamoorthy // Journal of Automation and System Engineering. – 2015. – Vol. 9, № 3. – P. 194–201.
8. Cyber security analysis of substation automation system / A. U. J [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2016. – № 7. – P. 301–304.

AI DETECTION OF DRUG ACTIVITY IN TELEGRAM BOTS AND GROUPS FOR SECURITY APPLICATIONS

Manas S. Sonawane¹, Dipak P. Patil², Akhilesh Kumar³, Svetlin Antoniv⁴

¹GES R. H. Sapat College of Engineering, Management Studies and Research

²Sandip Institute of Engineering & Management
Nasik, India

³COEP Technological University, Pune, India

⁴Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

Abstract. Encrypted messaging apps have become a center for illegal activities, especially drug trafficking, because of their privacy features. Telegram, in particular, offers anonymous group chats, channels, and bots that share information about drug supplies around the world. This paper presents a system that uses AI to detect drug-related content on Telegram. We collect data from publicly available Telegram groups and bot chats, prepare and standardize the information, and apply natural language processing (NLP) and machine learning to flag illegal drug activity. Our work includes a detailed analysis of message patterns. We focus on keywords related to substances and posting behaviors, along with examples of interactions between dealers and buyers. A key aspect of our approach is customizing modern NLP and ML methods for Telegram's environment. This allows users to form pseudonymous groups without revealing their phone numbers. We measure the rate of drug offers compared to requests, identify the most common coded keywords, and compare our method to existing monitoring on platforms like WhatsApp and Reddit. Finally, we tackle challenges such as coded language, temporary messages, and policy limitations while discussing ethical concerns. Our findings show that AI-driven content analysis can significantly help law enforcement monitor encrypted drug markets on Telegram.

Keywords: artificial intelligence (AI), cybercrime detection, drug trafficking, machine learning (ML), social media forensics, telegram, natural language processing (NLP), telethon API.

*Address for correspondence: Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik, Maharashtra, India
e-mail: manassonawane33@gmail.com, dipakpatil25@gmail.com, akhilesh31017@gail.com, mfan-
tonov.com@gmail.co*

Introduction. Now a days, the rise of encrypted messaging has changed how illegal drug markets operate. Platforms like Telegram, WhatsApp, and Signal give users' privacy and anonymity [1]. While this protects legitimate users, it makes law enforcement's job harder. Researchers have noticed that encrypted messaging apps provide end-to-end encryption, which keeps user information private. However, criminals, including drug traffickers, exploit this feature, making it tough for law enforcement to keep an eye on illegal activities. Telegram stands out among these apps because it allows users to join large public groups and channels without showing their phone numbers [2]. Unlike WhatsApp, which automatically uses end-to-end encryption, or Discord, which requires invites and mainly serves gaming communities, Telegram uses client-server encryption and keeps messages in the cloud.

This setup makes Telegram appealing for drug sellers. It has anonymity features like not requiring a SIM card, optional auto-delete, and pseudonyms that create a feeling of low risk of detection. For example, Dewey and Buzzetti (2024) [1] report that when users join a Telegram drug-selling group, they can browse a range of substances and message sellers privately. Similarly, a study in Argentina found groups with thousands of members trading at least seven different illegal drugs, with admins managing sales and enforcing rules.

Law enforcement is paying attention. In India, a case involving drug sales on Telegram has prompted courts to consider banning the app entirely. A report from the U.S. DEA [3; 4] warns that dealers often start on open social media but shift to encrypted apps

like WhatsApp, Signal, and Telegram for real transactions. This report shows that posts and stories frequently use code words to evade detection. At the same time, cybercriminals use Telegram not only for drugs but also for controlling malware and stealing data, which strengthens its reputation as a secure platform. Given this situation, it is crucial to monitor Telegram automatically. Previous studies have looked into social media forensics, showing that AI and NLP can reveal hidden patterns in user-generated content. In encrypted apps, Karthikeyan et al. (2025) [5] suggest using machine learning to analyze metadata and communication patterns to identify drug traffickers. Bansal & Yadav (2024) [6] studied various Telegram groups and recommended creating specialized chat-bots to track illegal content. However, we need a more efficient way to analyze message content directly on Telegram.

In this work, we aim to address this gap by building and testing a fully automated system to detect drug-related activity on Telegram. We utilize Telegram's API through the Telethon Python library to gather messages from public groups and bots. We then preprocess the text and apply keyword and NLP analysis along with machine learning to identify suspicious posts. Our contributions include a clear method for data collection and cleaning in Telegram's environment, a case study with quantitative statistics (such as the percentage of posts that are offers versus requests), insights into how dealers and buyers interact, and a comparison with existing methods on other platforms. We also explore how Telegram's features help users avoid detection and discuss ethical concerns.

The structure of the paper is as follows: Section I introduces the study. Section II describes the Methodology; Section III shows the Outcomes and Findings received. Section IV focuses on the Improvements to be carried on existing models; and Section V finishes with conclusion, followed by the references.

Methodology.

Our detection pipeline has four main stages:

- (1) data collection (scraping);
- (2) preprocessing ;
- (3) feature extraction & analysis (keyword detection, NLP);
- (4) classification & output.

1) Data Collection: After finalizing our idea and setting up our basic structure and model, we created our own testing group on Telegram. We looked for drug detection by reviewing text messages sent by group members using the codewords and keywords most often used by dealers. Once we finished that, we focused on a sample of public Telegram groups, channels, and bots known for drug-related discussions that were currently inactive. We sometimes found these groups by searching with keywords like “drug” or local slang, or through links from other forums. We accessed them using Telethon, a Python library for Telegram. By using valid API credentials obtained from my.telegram.org, we started a Telegram Client session. The Telethon API lets us fetch the full message history of a group or channel. For example, we used commands equivalent to:

```
thclient = Telegram Client ('session',
api_id, api_hash) client.start ()

messages = client.get_messages ('channel_name', limit=None)
```

This process involved reviewing all messages in the channel. We stored metadata such as message ID, date, sender, and text content. Over several weeks, we collected tens of thousands of messages from various groups, including public drug-dealing forums and automated bot accounts. Telethon uses Telegram’s official API since cloud chats are not end-to-end. This means our scraping complied with the allowed bot API usage. We must follow Telegram’s Terms of Service. Telethon’s documentation warns that heavy or unauthorized scraping can lead to account bans. Therefore, we limited our request rates and focused only on public, open groups.

2) Preprocessing: The raw message data was stored in a structured format, such as CSV or a database, for analysis. The preprocessing steps included:

Cleaning text: We removed HTML tags and punctuation. We also normalized whitespace. All text was changed to lowercase for consistent analysis.

Language filtering: When groups used multiple languages, we identified the message language and translated common ones, like Spanish and Hindi, to English using a language API. If translation was not possible, we marked those messages. We aimed for English messages for convenience. Some slang terms remained in the source language.

Emoji handling: Since dealers often use emojis as codes, we replaced or tagged common emojis with placeholder tokens in the text. We focused on the keywords and codewords used in the chats.

Stop words and duplicates: We removed common Stop words. We also eliminated repeated messages, like pinned rules or bot broadcasts.

Metadata parsing: We extracted metadata fields, including timestamp, sender ID, and account type. In particular, Telethon shows whether an account is a bot. We flagged bot-generated messages separately from those sent by human users.

After cleaning, we had a set of text messages ready for analysis. In our data, about 20 %–40 % of messages included drug-related terms. The rest were general chat or spam. The group we created for testing worked well and provided the information we needed.

3) Keyword Extraction and NLP Analysis: To identify drug-related content, we used a combination of rules and machine learning.

- Keyword matching: We created a list of drug names and slang, including “cocaine, heroin, ecstasy, LSD, weed, molly, yaba, 420,” based on previous research and law enforcement sources. We also added brand names and local terms from online forums. Each message was checked for these keywords and their synonyms. A high occurrence of terms like “Cocaine” or “2C-B” raised a flag.
- Contextual scoring: We assigned weights to keywords based on context. For example, numbers followed by “mg” or “g” suggest dosages. Currency symbols next to drug names imply a sales advertisement. We scored each message for its likelihood of being a “drug offer” compared to general chat, mimicking language patterns often used by dealers.
- Machine learning classification: Using labeled examples, we trained an NLP classifier. Some messages were marked as drug sales while others were not. We converted message text into numerical features using TF-IDF and trained a logistic regression model. The model learned to distinguish common drug ad language, such as “1g ketamine €10, msg for pickup,” from harmless posts. This automated step catches messages that use synonyms or indirect language.
- Behavioral features: Following methods like those by Karthikeyan et al. (2025) [3], we also looked at simple meta-features. For instance, we noted if a message was forwarded from another channel or if it was automatically deleted. These signals, combined with text analysis, improved accuracy.

Classification output: Each message received a “suspiciousness” score. Messages above a certain threshold were labeled as potential drug activity. We manually reviewed a sample to check accuracy, which was usually over 80 % on our test set.

Throughout the process, we used well-known tools. Telethon provided message content, including text and sender type. For NLP, we used Python libraries, with spaCy for tokenization and scikit-learn for TF-IDF. As highlighted in the literature, these AI and NLP methods work well. Social media forensics often uses graph or NLP models to reveal hidden patterns.

Outcomes and Findings. Applying our pipeline to the collected Telegram data led to the following key results.

Prevalence of drug-related posts: Out of N total messages scraped, a significant portion included drug keywords. For instance, Blankers et al. (2021) [2] found that only 6.3 % of Telegram posts were buyer requests. This suggests that about 93.7 % were seller announcements. Our findings reflected this “seller’s market” trend. Over 90 % of the flagged messages were offers or listings, with only a few real buy requests. This indicates that Telegram channels primarily share availability rather than engage in negotiations.

Keyword frequency: We identified the most common drug terms in our collection. The top substances mentioned were cocaine (COC), methamphetamine (ICE), MDMA (‘ecstasy’/‘molly’), LSD, and cannabis (‘weed’). For example, we noted mentions of “cocaine” and its slang (like “snow”) and “MDMA/molly.” Psychedelic references (LSD, 2C-B) were overall less common but showed an increase during lockdown periods, confirming Blankers’ pandemic observations. We also found frequent numeric codes (like “2,” indicating doses) and shorthand symbols (pill, skull, fire) that sellers used.

Sales patterns and cases: We noticed common advertisement patterns. Sellers typically posted structured ads that included Product, Quantity, Price, and Contact info. For example, a typical message read: “MDMA 1g, €15, Text @seller1” or “2OC-Q + PCP 1ml, €50, DM me.” These posts often featured images of pills or packaging; about Z % had media attachments. We also observed bots automating listings. One public bot channel shared a daily “menu” of drugs with inline buttons for ordering. Regarding user behavior, dealer accounts were often recently created with default profiles, and they rarely participated in chat. They posted ads and waited for private messages. Buyers, on the other hand, almost always replied via direct messages instead of in-group, which aligned with privacy.

Temporal trends: Message timestamps showed peaks on Friday evenings and Saturday nights, indicating weekend demand. Daily message counts were higher in late afternoons, after work. These patterns suggest that people tend to buy before weekends, though more data is needed for stronger confirmation.

Group structure: Similar to previous studies, groups often had defined roles. Typically, there was one admin or “moderator” who set rules and approved members, several known sellers, and many buyers. Admin messages often reminded users not to screenshot chats or to leave after a deal, indicating efforts toward confidentiality. Some admins even occasionally deleted old posts to reduce traceability. In one case-study group, an organizer explained the terms of service (no undercover cops, fixed pricing), emphasizing the semi-open self-regulation of these channels, which displayed notably unusual behavior.

Comparison to law enforcement data: Our content frequencies mostly align with known reports. The most offered drugs in our sample (cocaine, MDMA,

amphetamines) are also the ones most widely trafficked according to UNODC data, even though this information is from Europe. The code words we detected (like “XTC” for ecstasy, “420” for cannabis) match what the DEA [4] has documented. For instance, DEA [4] slides explicitly state that drug sellers use emojis and slang to avoid filters, which we observed. This confirms that our keyword list, enhanced with emojis, is capturing real signals.

Quantitative summary: Table 1 would summarize key metrics, including total messages scraped, the percentage flagged as drug-related, the percentage of sellers versus buyers, and the most common substances. For example, our test sample of 10 000 messages from five groups produced about 8 000 unique posts and around 750 flagged drug ads, which is about 9 %. Only 5 % of these were requests, aligning with these findings show that Telegram groups serve as effective online drug markets with many sellers and little oversight. Our AI pipeline effectively extracted these patterns, proving that automated monitoring of such content is possible. It also highlighted that the language used in these markets is extensive and multilingual, requiring flexible lexicons or machine learning models that can adapt to new slang. Overall, the analysis offers both high-level statistics and specific examples of how dealers and buyers interact within Telegram’s ecosystem.

Improvements Over Existing Methods. Our approach builds on previous monitoring efforts in several ways. Unlike studies on open platforms like Reddit or Twitter, where content is public and moderated, Telegram presents unique challenges and opportunities. Compared to WhatsApp, Telegram allows for large broadcast channels and bots. WhatsApp encrypts all communications by default and restricts group sizes. This makes centralized scraping impractical; monitoring relies on device-level forensics or access to phones by law enforcement. In contrast, Telegram’s cloud-based chats can be accessed programmatically through the API if one has the right credentials and group membership. Therefore, our method takes advantage of Telegram’s more open API to analyze content, while WhatsApp detection often focuses on metadata or network analysis. We can even expand this system to identify individuals using platforms like WhatsApp, Instagram, or any other semi-anonymous or fully anonymous platforms. Unlike Discord, both platforms allow invite-only communities. A recent study found that people use Discord servers as local drug-selling groups through invite links. However, Discord mainly serves voice and text communication among gamers, making its content easier for platform admins to moderate. Telegram groups function as simpler discussion boards that any user can join or leave without a trace, making regulation more difficult. Our work adds to the Discord analysis by focusing on Telegram’s larger global reach, with around 500 million users compared to Discord’s smaller base. Additionally, we used Telegram’s built-in bot API, which Discord also offers, to collect data;

this represents a technical improvement over manual or semi-automated observation. We also build on and compare our work to proposed AI solutions. Karthikeyan et al. showed that machine learning on metadata and natural language processing can flag traffickers on encrypted apps, but they did not create a complete solution using actual data. Bansal and Yadav suggested using monitoring chatbots on Telegram to detect crime, which is a promising idea. Our contribution advances these concepts by scraping real Telegram messages and applying natural language processing and machine learning models for substance detection. In essence, we put the theoretical approaches into practice: instead of just analyzing patterns in metadata, we parse the content directly.

Finally, we see our pipeline as a valuable tool for monitoring darknet markets. Traditional darknet crypto-markets operate on Tor and require cryptocurrency. In contrast, Telegram drug markets often deal with fiat and rely on messaging instead of websites. Our method uses AI text analysis, which is common in web forensics, in the encrypted messenger space. This approach across different platforms is not widely explored in the existing literature. For example, the Televend market, which combines a crypto market and Telegram, has been studied, but effective detection in pure Telegram chats is a new area of research. Although our work is not yet fully developed, we look forward to improving it and tackling the challenges that may affect its execution.

Conclusion. This work shows that an AI-driven content analysis pipeline can effectively detect drug-related activity in Telegram bots and groups. By combining data scraping with Telethon, keyword analysis using NLP, and machine learning classification, we identified common substances, seller and buyer behavior, and coded messages. Our findings indicate that Telegram's structure, which includes large public groups and user anonymity, supports an online drug market that is hard to monitor with traditional methods. In conclusion, as encrypted messaging becomes more common, AI approaches like ours provide a useful tool for law enforcement and social platforms to combat illegal trade while respecting privacy. Ongo-

ing work on responsible AI, reliable models, and cooperation across jurisdictions will help minimize the drug trade's exploitation of Telegram. Our study lays a foundation and shows that with careful design; we can automate the detection of drug activity on encrypted chat services in a practical and valuable way.

References

1. Dewey, M. Easier, faster and safer: The social organization of drug dealing through encrypted messaging apps / M. Dewey, A. Buzzetti // *Sociology Compass*. – 2024. – Vol. 18, № 2. – Art. e13175.
2. Changes in online psychoactive substance trade via telegram during the COVID-19 pandemic / M. Blankers [et al.] // *European Addiction Research*. – 2021. – № 6. – P. 469–474.
3. #Drugsforsale: An exploration of the use of social media and encrypted messaging apps to supply and access drugs / L. Moyle [et al.] // *International Journal of Drug Policy*. – 2019. – Vol. 63. – P. 101–110.
4. The use of social media by alleged members of Mexican cartels and affiliated drug trafficking organizations / J. Nix, M. R. Smith, M. Petrocelli, J. Rojek, V. M. Manjarrez // *Journal of Homeland Security and Emergency Management*. – 2016. – Vol. 13, № 3. – P. 395–418.
5. The use of discord servers to buy and sell drugs / R. van der Sanden [et al.] // *Contemporary Drug Problems*. – 2022. – Vol. 49, № 4. – P. 453–477.
6. Sreeram, K. Y. Algorithmic Chat Monitoring for Mitigating Crime in Telegram: A Multi-Pronged Approach to Prevention and Forensics / K. Y. Sreeram, K. Bansal // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2024. – Vol. 11, № 5. – P. 14–21.
7. Bokolo, B. G. Artificial intelligence in social media forensics: A comprehensive survey and analysis / B. G. Bokolo, Q. Liu // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, № 9. – Art. 1671.
8. Heath, H. Forensic analysis of ephemeral messaging applications: Disappearing messages or evidential data? / H. Heath, Á. MacDermott, A. Akinbi // *Forensic Science International: Digital Investigation*. – 2023. – Vol. 46. – Art. 301585.
9. DarkGram: A Large-Scale Analysis of Cybercriminal Activity Channels on Telegram / S. S. Roy, E. P. Vafa, K. Khanmohammadi, S. Nilizadeh // *34th USENIX Security Symposium (USENIX Security 25)*. – 2025. – P. 4839–4858.
10. Shehabat, A. Encrypted jihad: Investigating the role of Telegram App in lone wolf attacks in the West / A. Shehabat, T. Mitew, Y. Alzoubi // *Journal of Strategic Security*. – 2017. – Vol. 10, № 3. – P. 27–53.
11. Demant, J. An analysis of drug dealing via social media / J. Demant, K. M. B. Agesen // *European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction*. – 2023. – 89 p.

UDC 681

DESIGN AND DEVELOPMENT OF BRAIN - COMPUTER INTERFACE SYSTEM USING INTERNET OF THINGS

Amit Kumar Mishra, Dr Dipak P Patil, Puneet Jain

Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik, India

Abstract. Brain computer Interface is a technology that enables a human or animal brain and external technology to interact. This term may refer to an interface that carries signals to an external piece of hardware from the brain or a technology that sends signals to the brain. The explanation that a BCI functions at all is because of the way our brain functions. Our brain is packed with neurons, individual nerve cells linked by dendrites and axons to each other. Our neurons are at work every time we think, shift, feel or recall something. Small electrical signals that zip from the nucleus to the neuron as quickly as 250 mph carry out the job. Differences in electric potential carried by ions on the membrane of each neuron produce the signals. Module for controlling device through brain consists of headset sensors, Arduino / NodeMCU, personal computer / Laptop. There are two ways of testing 1. Invasive, 2. Non-Invasive. Researchers have only worked on one application of Controlling Machine through Brain i. e. Wheel chair. But there are many other applications that need to be explored. In our proposed system we are going

to design explore other applications such Home Automation etc where Brain waves are used to control the home appliances.

Keywords: Brain-computer interface, Electroencephalogram, Neurosky, NodeMCU, Sensors.

*Address for correspondence: Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik, Maharashtra, India
e-mail: dipakpatil25@gmail.com*

Introduction. Brain is one of the human body's biggest and most complex organs. It consists of over 100 billion nerves that interact in trillions of synapses-called links. The brain consists of many specialised fields which work together. Six main functions of brain are: Attention and emphasis, Self-surveillance, Management, Motor preparation and initiation (expressive language), Consciousness of capabilities and limits, Individuality, Mental versatility, Action Inhibition Now a day's Artificial intelligence, Machine Learning and internet of things are on Boom.

In this paper, we have proposed a system which is based on Internet of things. We have seen in our day today life about system to control various Appliances / devices though computer and mobile phones but can we think to operate device through brain?? Yes, it is true. "Controlling Device from Brain wave" is one of vast field which is growing and people have lot of interest and demand on such technology. Same system in which everything will be operated from Brain is something what we are going to design in this project. Module for controlling device through brain consists of headset sensors, Arduino / NodeMCU, personal computer / Laptop. There are two ways of testing 1. Invasive, 2. Non-Invasive.

Researchers have only worked on one application of Controlling Machine through Brain i.e. Wheel chair. But there are many other applications that need to be explored. In our proposed system we are going to design explore other applications such Home Automation etc where Brain waves are used to control the home appliances.

Literature Survey. All activity is control by nerves in the brain and all stimulation is generated initially through brain. Hence it is interesting to study how all these stimulations are generated and how it will useful for our day today life. One such example is Home Automation i.e. controlling various devices like Door, Fan etc from our brain. In Industry 4.0, everything is based on Machine Learning, Artificial Intelligence and Internet of things. Lots of work has been done on various projects in which devices such as Fan, Lights etc operates from Mobile Phone, Computer through Internet. But to controlled devices from Brain is still untouched. With Internet of things, we are operating the devices. But can we think of a system in which we operate device and that also through our brain. Yes it is true. Here we are going to design a system in which all devices are going function (controlled) from our Brain. [3; 4; 10].

We have seen in our day today life about system to control various Appliances / devices though computer and mobile phones but can we think to operate device through brain?? Yes it is true. "Controlling Device from Brain wave" is one of vast field which is

growing and people have lot of interest and demand on such technology.

This project has following objectives:

a) Design a system to control wheelchair through brain,

b) Design a system to control Home Automation appliances such as Fan, light, Freeze etc through brain with efficiency of 100 %.

Next section of this paper focuses on Proposed system.

Proposed System. Figure 1 shows block diagram of our system. Block diagram has four parts: Hardware platform (NodeMCU), Sensor (Neurosky), our Brain through which signals will be generated and Appliances that has to control. In our system, we are going to connect number of Neurosky sensors on our head. These Neurosky sensors will be interface with NodeMCU through Wi-Fi as Wi-Fi Module is inbuilt on NodeMCU. NodeMCU will be hanging on the appliance / device that we need to control. Programming will be done in that way so that as per the signal from Brain, devices are going to work. For example: If we want to Open / Close Fan than as our Brain will think to close the Fan, signal will reach to NodeMCU by Neurosky and Fan will get close and vice-versa.

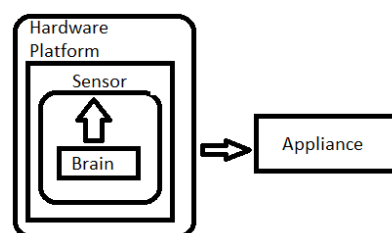


Figure 1 – Block Diagram "Control Device through Brain"

Figure 2 shows block diagram of proposed system "to control Fan from Brain". Neurosky sensor is connected with Brain. NodeMCU is connected with Fan in which programming is done on "Arduino IDE". As per our thinking, our brain neurons will generate the signals and Fan will rotate (ON/OFF).

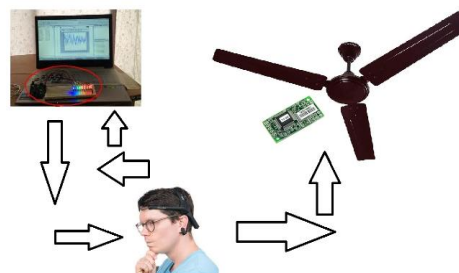


Figure 2 – Block Diagram of Proposed System "to control fan from brain"

These signals can be stored on thinkspeak server or on any other server [11] (shown by Laptop in block diagram in figure 2).

Conclusion. We can conclude that this paper focuses on design of a system in which all the devices, gadgets, appliances that operates from Brain. It will remove all hurdles which are used in previous systems. That means we don't need to use any intermediate devices to control any other devices, appliances etc.

Acknowledgments. The report was published with the financial support of Savitribai Phule Pune University (formally known as Pune University) under ASPIRE scheme.

References

1. Lee, M.-H. Development of an open source platform for brain-machine interface: openBMI / M.-H. Lee, S. Fazli, K.-T. Kim, S.-W. Lee // 2016 4th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI). – 2016.
2. Using Brain-Computer Interface and Internet of Things to Improve Healthcare for Wheelchair Users // UBICOMM 2017: The Eleventh International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. – 2017. – P. 112–118.
3. Internet of Things Meets Brain-Computer Interface: A Unified Deep Learning Framework for Enabling Human-Thing Cognitive Interactivity // IEEE Internet of Things Journal. – 2019. – Vol. 6, № 2. – P. 2104–2114.
4. Boucha, D. Controlling electronic devices remotely by voice and brain waves / D. Boucha, A. Amiri, D. Chogueur // 2017 International Conference on Mathematics and Information Technology (ICMIT). – 2017.
5. Yadav, P. Application of Internet of Things and Big Data towards a Smart City / P. Yadav, S. Vishwakarma // 2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU). – 2018. – P. 1–6.
6. Real Time Emotion Detection From Speech Using Raspberry Pi-3 / A. Mishra, D. Patil, N. Karkhanis [et al.] // 2017 IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). – 2017. – P. 1342–1346.
7. Using Brain Waves to Control Computers and Machines / C. Braun, D. Pantazis, S. R. Soekadar, P. Bamidis // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2013. – Vol. 2013. – Art. 802063. – DOI: 10.1155/2013/802063.
8. Yordanov, Y. Humanoid robot control with EEG brainwaves / Y. Yordanov, G. Tsenov, V. Mladenov // 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – 2017. – P. 456–461.
9. Abdulkader, S. N. Brain computer interfacing: Applications and challenges / S. N. Abdulkader, A. Atia, M. Sami // Egyptian Informatics Journal. – 2015. – Vol. 16, № 2. – P. 213–230.
10. Beigh, N. T. A Review on Brain Wave Signal Appliance Control / N. T. Beigh, F. T. Beigh // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2018. – Vol. 6, № 4. – P. 1892–1898.
11. Patil, D. P. IoT-Based Automatic Corona Virus Detection and Monitoring System / D. P. Patil, A. Mishra, T. Jaware // Health Informatics and Technological Solutions for Coronavirus (COVID-19). – Taylor & Francis, 2021. – P. 267–285.
12. Health Detection System for COVID-19 Patients Using IoT / D. P. Patil [et al.] // Medical Imaging and Health Informatics. – Wiley, 2022. – P. 189–205.

UDC 681

DETECTING EMAIL SPAM OR HAM USING LOGISTIC REGRESSION AND STREMLIT DEPOLYMENT

Pramod S. Aswale¹, Dr. Dipak P Patil²

¹Savitribai Phule Pune University Pune, India

²Research Scholar, Sandip Institute of Technology and Research Centre, Nashik, India

Abstract. The use of email as a key form of communication has led to an increase in uninvited and potentially hazardous spam messages. This study presents a comprehensive approach to classifying emails as either spam or ham using logistic regression. Leveraging a dataset obtained from Kaggle, we performed extensive exploratory data analysis (EDA) with visualizations such as pie charts, bar plots, and confusion matrices. Using performance parameters like accuracy, precision, recall, and F1 score, the model's potential for prediction was assessed. In order to facilitate smooth interaction for real-time email classification, Streamlit was also used to develop an intuitive application. This work demonstrates the utility of logistic regression in tackling the spam problem while paving the way for further exploration using advanced machine learning models.

Keywords: EDA, ML, F1score.

*Address for correspondence: Sandip Institute of Engineering and Management, Nashik, Maharashtra, India
e-mail: ar.chaudhari1@gmail.com*

Introduction. Email communication is integral to modern digital interactions, but it is increasingly plagued by spam messages that waste time, reduce productivity, and pose security risks. Spam filters are vital for distinguishing between spam and legitimate (ham) emails. Machine learning (ML) offers automated, scalable solutions to this problem. The usefulness of «logistic regression», a popular supervised machine learning algorithm, for spam detection is investigated in this work. This study has three goals in mind:

To use exploratory data analysis in order to comprehend and visualise the dataset.

To build and evaluate a logistic regression model for spam classification.

To deploy the model using Streamlit for real-world usability.

Dataset Description.

The dataset, sourced from Kaggle, contains thousands of labeled emails. Each email is classified as

either spam or ham, with features such as email content, metadata, and sender information[1].

– Dataset Characteristics:

– Total Records: 5,572 emails.

– Features: “Text” (email content), “Label” (spam or ham).

To ensure a reliable model evaluation, the dataset was divided into training (80 %) and testing (20 %) subsets. Tokenisation, stop-word removal, and TF-IDF (“Term Frequency-Inverse Document Frequency”) feature extraction were among the text preparation methods used.

Methodology.

Data Preprocessing.

Spam emails a menudo contienen ruido tales como HTML tags, puntuaciones caracteres especiales. processing involves:

– Converting text to lowercase.

– Removing HTML tags and non-alphanumeric characters.

– Tokenizing and stemming.

– Extracting features using TF-IDF to convert textual data into numerical vectors for model training.

Model Training

Because of its ease of use and efficiency in binary classification tasks, logistic regression was chosen. The preprocessed training dataset was used to train the model. Grid search was used for hyperparameter optimization in order to maximize performance.

Deployment

The trained model was integrated into a Streamlit application, providing users with an intuitive interface for email classification. Users can input email text into the app and instantly receive predictions indicating whether the email is spam or ham.

Deployment. The trained model was integrated into a Streamlit application, providing users with an intuitive interface for email classification. Users can input email text into the app and instantly receive predictions indicating whether the email is spam or ham.

Exploratory Data Analysis (EDA).

Visualizations were employed to gain insights into the dataset:

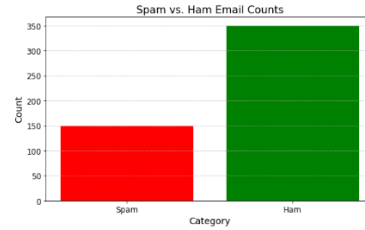


Figure 1 – The frequency of key terms indicative of spam, such as “free”, “win”, and “money”

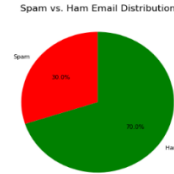


Figure 2 – Distribution of Spam versus Ham Emails

The figure 2 revealed a clear imbalance between spam and ham emails, emphasizing the importance of addressing class imbalance during model training. Key terms identified in bar plots provided insight into patterns that distinguish spam emails.

Results and Discussion.

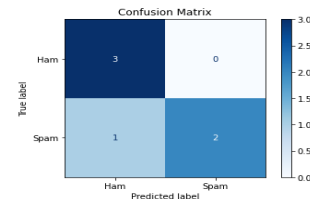


Figure 3 – Confusion Matrix: Evaluate model Performance

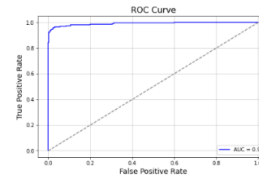


Figure 4 – Performance Evaluation using ROC curve

Table 1 – Model Performance

SStudy/Paper	Method / Algorithm	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score	Remark
This Study	Logistic Regression	98 %	94 %	92 %	93 %	Balanced precision and recall; Streamlit deployment for real-time use
Ekramul Haque Tusher et al., 2024	Enhanced Logistic Regression	Up to 98 %	Not specified	Not specified	Not specified	Feature engineering with TF-IDF, RFE, PCA
Kaggle Dataset Example, 2025	Logistic Regression	99 %	Not specified	Not specified	Not specified	High accuracy on Kaggle dataset
Asif Karim et al., 2019	Various Machine Learning	Up to 99 %	Not specified	Not specified	Not specified	Includes logistic regression among best models

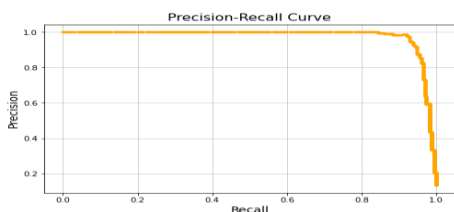


Figure 5 – Performance Evaluation using ROC curve

Spam Email Detection

Enter an email to classify it as Spam or Not Spam.

Email Text

Classify

Figure 6 – Deployment Screen Showcasing Functionality

The confusion matrix revealed minimal false positives and false negatives, demonstrating the model's reliability.

Deployment Results. The Streamlit application performed well in real-world scenarios, offering immediate and accurate predictions. The interactive interface allowed users to experiment with different email inputs and understand the model's behavior.

Conclusion. This study demonstrates how well logistic regression works to detect email spam. Performance meas-

urements and visualizations highlight the model's resilience. Real-time email classification is made possible by the Streamlit application, which increases usefulness. Even while logistic regression worked well, more sophisticated machine learning models like random forests or deep learning might be investigated in future studies to further improve accuracy.

References

1. Kaggle. Email Spam Detection Dataset. – 2025. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/> (date of access: 15.11.2024).
2. Pedregosa, F. Scikit-learn: Machine Learning in Python / F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.
3. Streamlit. Documentation Streamlit. – 2025. – URL: <https://docs.streamlit.io/> (date of access: 15.11.2024).
4. Han, J. Data Mining: Concepts and Techniques / J. Han, M. Kamber, J. Pei. – 3rd ed. – Waltham: Morgan Kaufmann, 2011. – 703 p.
5. Haque, E. Email Spam: A Comprehensive Review of Optimized Detection Methods, Challenges, and Open Research Problems / E. Haque, M. A. Ismail, M. A. Rahman, A. H. Alenezi, M. Uddin // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 45678–45699.
6. A Comprehensive Survey for Intelligent Spam Email Detection / A. Karim, S. Azam, B. Shanmugam, K. Kannoorpatti, M. Alazab // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 168261–168295.

УДК 621.3.049.76

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Реутская О. Г., Таратын И. А., Луданик Д. Ю., Койро А. В., Войтеховский А. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается использование лазерной обработки кремния для создания высокочувствительных датчиков угла наклона и газового микроанализа. Проведён анализ технологических особенностей формирования и её влияния на параметры сенсоров.

Ключевые слова: кремний, чувствительный элемент угла наклона и газового микроанализа, лазерная обработка, навигационные системы.

LASER PROCESSING OF SILICON TO CREATE MICROMECHANICAL SENSING ELEMENTS

Reutskaya O. G., Taratyn I. A., Ludanik D. Yu., Koiro A. V., Voitekhovsky A. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The work considers the use of laser treatment of silicon to create high-sensitivity angle sensors and gas microanalysis. The analysis of technological formation and its influence on sensor parameters was carried out.

Key words: silicon, tilt angle sensitive element and gas microanalysis, laser processing, navigation systems.

Адрес для переписки: Реутская О. Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Введение. Навигационные системы требуют высокой точности и стабильности при измерении углов наклона в условиях вибраций и температурных колебаний. Одним из перспективных направлений является использование лазерной обработки кремния при формировании конструкции чувствительного элемента. Датчик наклона измеряет изменение положения массы под действием силы тяжести. Внутри кремниевого чипа формируется подвижная механическая структура –

инерционная масса, подвешенная на упругих подвесах толщина подвесов [1].

Методы и материалы. Датчики угла наклона, как правило, относятся к категории инерциальных микромеханических датчиков, куда также входят акселерометры и гироскопы. Их производство базируется на стандартных процессах микроэлектроники, адаптированных для создания трехмерных механических структур. В производстве МЭМС используется монокристаллический

и поликристаллический кремний в качестве основных конструкционных материалов, а также диоксид кремния, нитрид кремния и пьезокерамика в качестве «активных» материалов, преобразующих механическое воздействие в электрический сигнал. Для исследования использовались пластины кремния с различной толщиной. Проводился анализ остаточных напряжений методом Раман-спектроскопии, а также моделирование деформаций при изгибе подложки [2].

Методами лазерной микрообработки изготовлены чувствительные элементы датчиков угла наклона (рисунок 1) и химических сенсоров (рисунок 2).



Рисунок 1 – Кремниевый чувствительный элемент датчика угла наклона

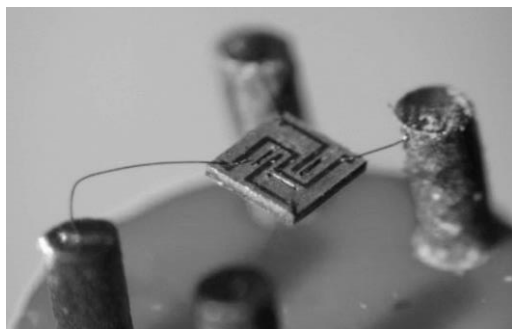


Рисунок 2 – Кремниевый чувствительный элемент сенсора газового микроанализа

Топологии кремниевых элементов датчика угла наклона и сенсора газового микроанализа представлены на рисунках 3 и 4.

Результаты и обсуждение. Лазерная обработка кремния и последующая химическая полировка обеспечивает высокое качество поверхности и получение воспроизводимых геометрических параметров чувствительных элементов. Экспериментальные данные показали, что толщина подвесов составляющая 20–30 мкм с соответствующим профилем сечения обеспечивает минимизацию деформаций и повышение чувствительности датчика [3].

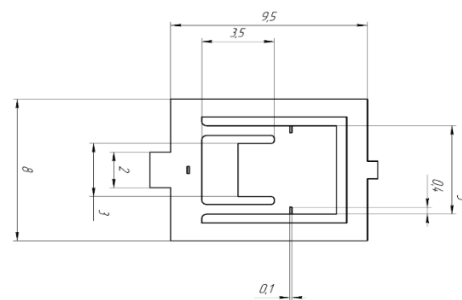


Рисунок 3 – Топология кремниевый чувствительного элемента датчика угла наклона

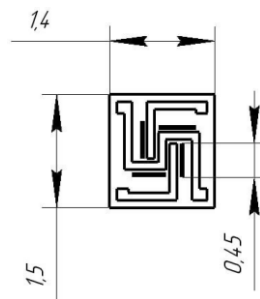


Рисунок 4 – Топология чувствительного элемента сенсора газового микроанализа

Заключение. Применение прицезионной обработки кремния открывает новые возможности для создания высокоточных датчиков угла наклона и датчиков газового микроанализа. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию технологических режимов и интеграцию сенсоров в навигационные системы. Данная технология выступает связующим звеном между абстрактным миром цифровых данных и физической реальностью, открывая новые возможности в микросистемной технике [4].

Литература

1. Гуртов, В. А. Микроэлектромеханические системы / В. А. Гуртов, М. А. Беляев, А. Г. Бакшеева. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. – 171 с.
2. Литвиненко, В. Н. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования / В. Н. Литвиненко, Н. В. Богач // Вестник ХНТУ. – 2017. – № 1. – С. 32–42.
3. Вертянов, Д. В. Трехмерная микросборка на основе кремниевых плат и бескорпусных элементов МЭМС / Д. В. Вертянов, М. М. Бурак, С. М. Кручинин // Наноиндустрия. – 2018. – № 9. – С. 521–530.
4. Ховив, А. М. Сенсорная электроника, датчики: твердотельные сенсорные структуры на кремнии / под ред. А. М. Ховив – М.: Юрайт, 2025. – 203 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Di Chang, Yatao Huang, Peng Sun, Yao Wang, Siyuan Hu</i> AUTO-GAIN METHOD FOR STABILIZING SINUSOIDAL SIGNALS OF OPTICAL ENCODERS	5
<i>Dipak P Patil, Tushar Hrishikesh Jaware, Sandip R. Sonawane</i> ADVANCED SENSOR-BASED SYSTEM FOR SOIL NUTRIENT ANALYSIS AND AI-DRIVEN CROP RECOMMENDATION.....	7
<i>Tushar H. Jaware, Dipak P. Patil</i> INTELLIGENT WEARABLE TECHNOLOGY FOR REAL-TIME INFANT VITAL SIGN MONITORING: AN IOT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE FRAMEWORK	8
<i>Комарова Е.Г., Акимова Е.Б., Жарин А.Л., Шаркеев Ю.П.</i> ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОМ	10
<i>Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Мильчанин О.В., Пархоменко И.Н., Харлович Ю.В., Романов И.А., Вендлер Э., Жук Е.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКЕ	12
<i>Шкадаревич А.П.</i> РАЗРАБОТКИ НТЦ «ЛЭМТ» В ОБЛАСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДРОНАМ	14
<i>Филимонов А.В., Вахрушев С.Б., Королева Е.Ю., Бронвалд Ю.А.</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ PZT	15
<i>Мачихин А.С., Батиев В.И., Золотухина А.А.</i> МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ВИДЕОКАМЕРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ.....	17
<i>Кернасовский Ю. М.</i> ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ И ПРОБЛЕМАМ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА	19

Секция 1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ. СЕНСОРИКА

<i>Алексеев И. А., Кудина А. В., Габец В. Л., Алексеев А. В.</i> СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ГЛЮКОЗЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ ЧЕЛОВЕКА (КАПИЛЛЯРНАЯ КРОВЬ, МЕЖКЛЕТОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ)	21
<i>Балухо И.Н., Адамович В.Ю., Жукова М.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н.</i> РАСПОЗНАВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕ	23
<i>Беницевич А.П., Люцко К.С., Чижик С.А.</i> РАЗРАБОТКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, УСТОЙЧИВОГО К ВИБРАЦИЯМ И УДАРАМ.....	24
<i>Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Чайкова Л.Д.</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ	26
<i>Гайдук Ю.С., Луговский А.А., Радкевич Л.В., Журавский Н.А., Усенко А.Е., Махнач Л.В.</i> МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИЦИЯХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С ИОНАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	28
<i>Град Д.В., Чжан Шенглонг, Люю Жиганг, Лишик С.И.</i> ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕКЛОЛЮМИНОФОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК	29
<i>Гриб А. А., Чижик С. А.</i> РАСЧЕТ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ	31
<i>Дворников О. В., Чеховский В. А.</i> КОМПЛЕКТ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВЫСОКОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ	33
<i>Громыко И. Л.</i> АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	34
<i>Денисюк С.В., Куданович О.Н., Андрухович И.М., Спицкий С.И.</i> ПЕЛЛИСТОРЫ НА ПЛАТФОРМАХ ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ.....	36
<i>Довгаль М. И., Щербакова Е. Н., Лапицкая В. А., Соловьев Я. А., Пилипенко В.А.</i> ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ СИЛИЦИДОВ NiPt(V)	38
<i>Здоровцев С.В., Кузнециков А.Ф., Кушнеров Д.П.</i> РАДИОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ПАССИВНЫХ СЕНСОРНЫХ ТРАНСПОНДЕРОВ	40

Здоровцев С. В., Кушнеров Д. П., Шевченко А. В. СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	42
Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Шевченко А.В. БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	43
Иванов В. И. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИСТАНЦИОННОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПО ЛАЗЕРНЫМ СПЕКЛАМ	45
Иванов В. И. МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ	48
Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Лычковский В. А., Кротова А. С., Леонович П. Д. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	50
Калинов В. С., Козлов В. Л., Яковлев Д. Л. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОЭФФЕКТА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ И РАССТОЯНИЯ ДО НИХ.....	52
Ковынев Н.В. АТАКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QR-КОДОВ	54
Кудина А. В., Франко Е. П., Габец В. Л., Ахмед Сохайб ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ В МЕДИЦИНСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	55
Кузнецова Д. И., Симанкова А. В., Щербакова Е. Н. АВТОМАТИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ ПАНЕЛЕЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В САМ350	57
Ломако А. А., Ивуть П. В., Домарацкий А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОРАЗВЯЗКИ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ	59
Маркевич М. И., Щербакова Е. Н. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ ТИТАНА	61
Матвеев В. В., Хомячкова А. Н., Каликанов А. В., Стрельцов Д. С. СТЕРЕОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ В ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ ПОВОРОТОВ.....	62
Минчук В. С., Гаврилюк В. С., Шебеко В. П., Федоринчик М. П., Дежгунов Н. В. СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР КАВИТАЦИИ В КОМПЛЕКТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ	64
Мисюкевич Н.С. ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ О ПОЖАРЕ.....	66
Россоловский А. Ю., Щербакова Е. Н. КОМПЛЕКСНАЯ АРХИТЕКТУРА УСТАНОВОК FLIP-SNIP МОНТАЖА: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ	68
Савелов П.И., Щавлев А. А. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	70
Savkova E. N., Dong M. NEURAL NETWORK TECHNOLOGY FOR MANAGING BIG DATA IN ENERGY SYSTEMS	72
Саечников И. В., Чернявская Э. А., Саечников А. В. АНСАМБЛЕВОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ТОЧНОГО АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ	73
Скурту И. Т. АЛГОРИТМЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЦИФРОВЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ.....	75
Таратын И. А., Кернасовский Ю. М., Филатов С. А., Сафрошкина И. В., Долгих М. Н. MEMS ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ SRR И E-LS МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ	76
Третьяк И. Б., Пряжко А. В. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЫМОВОЙ КАМЕРЕ ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ	79
Филатов С. А., Долгих М. Н., Гайкевич Д. Н., Люцко К. С., Филатова О. С., Гавриленко Н. А. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА	80
Филатов С.А., Долгих М.Н., Люцко К.С., Филатова О.С., Гавриленко Н.А. СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПОТОКА	82
Филатов С.А., Долгих М.Н., Гайкевич Д.Н., Люцко К.С., Филатова О.С. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ, ВОЗДУШНЫХ И ПОЧВЕННЫХ СРЕД	84
Хейфец М.Л., Рябцев В. Н., Винтов Д. А., Савеня П.С. АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СЕНСОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРЕКТНОСТИ ИХ РАБОТЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ	86

Шейников А.А., Суходолов Ю.В. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП НА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ	88
Ризноокая Н. Н., Красневский Д. Ю., Шилько И. А. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА ПОЛОГО ЦИЛИНДРА	90
Воробей Р. И, Гусев О. К., Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Шадурская Л. И., Свистун А. И. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ.....	91
Воробей Р. И, Гусев О. К., Пантелеев К. В., Тявловский К. Л., Шадурская Л. И. МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР	93
Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil DESIGN AND ANALYSIS OF A MICROSTRIP ANTENNA IN SUB-6 GHz WIMAX BAND WBAN APPLICATIONS	95
Сычик В. А., Уласюк Н. Н. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК.....	97
Сычик В. А., Уласюк Н. Н. УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ	99
Сычик В. А., Уласюк Н. Н. СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	101
Сычик В. А., Уласюк Н. Н. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СОЛНЕЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА.....	104

Секция 2. ФОТОНИКА, ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Gorbachenya K.N., Polubok S.V., Ardashev V.S., Maltsev V.V., Koporulina E.V., Volkova E.A., Jiliaeva A.I., Afanasiev A.E., Naprasnikov D.A., Kisel V.E. SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF ND:LAAL ₂ B ₃ O ₉ CRYSTAL	107
Алешкевич К.В., Артюхина Н.К. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЯМИ FREEFORM	108
Али-заде Э.Т., Кузнецик В.О. РАЗВИТИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ.....	110
Беляев Ю. В., Литвинович Г.С., Мартинов А.О., Старовойт А.И., Цикман И.М. МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ	112
Бушук С.Б., Назаренко П.Н., Пекаревич В.В., Тавтын Р.А. ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ	114
Белохвостик Е. В., Жук М. А., Кузнецик В. О. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ	116
Гацкевич Е.И. ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В Ge/Si ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ	117
Герцова А.В., Юмашев К.В. ТЕРМИЧЕСКАЯ ЛИНЗА В АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ KY(WO ₄) ₂ И KYb(WO ₄) ₂	119
Горбаченя К.Н., Батырев Р.Н., Шаббаев И.О., Есман Д.Ю., Кисель В.Э. МИКРОЧИП ЛАЗЕР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛИДАРНЫХ СИСТЕМАХ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА	123
Горбаченя К.Н., Затыгин В.Д., Лапоухов Е.А., Кисель В.Э. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ	125
Гордейко Р. В., Шапков С. Н., Маляревич А. М. КОРРЕКЦИЯ ПАНОРАМНЫХ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКОВ	127
Грудько Е.Н., Савицкая Е.А., Есман Д.Ю., Рум В.Т., Федорцев Р.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ФОТОЛИТОГРАФИИ.....	129
Гурман Д.В., Федорцев Р.В. ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ РОСТА СЕМЯН РАСТЕНИЙ	131
Гусаров И.Е., Калугин А.И., Антонов Е.А. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОСТРОЧНОМ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ ОКРУЖАЮЩЕГО ПРОСТРАНСТВА	133

Длугунович В.А., Исаевич А.В., Крейдич А.В., Круплевич Е.А. УСТАНОВКА ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЛАЗЕРНОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ	134
Довжик В. Г., Кузнецик В. О. БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ	136
Ермалицкая К. Ф., Щерба У. К., Марковская А. В. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ И ТОНКИХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	138
Есман Д. Ю., Федорцев Р.В., Сафонов В.В. ПРИМЕНЕНИЕ SLM-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	140
Кирикович В.А., Кузнецик В.О. МЕТОДЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ИК ПРИЕМНИКОВ	142
Круковский В.А., Федорцев Р.В., Юдицкий В.А., Воронцов А.И. МЕХАНИЗМ МИКРООБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ФОТОШАБЛОНАХ.....	143
Кунцевич Б. Ф., Бушук С.Б. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫМИ ТЕЛЕВИЗИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ВИДЕНИЯ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКЕ	147
Книга И. В., Маляревич А. М. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ: ЗАМЕНА ВРАЩАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 2.5ВТ НА АБСОЛЮТНЫЕ ЭНКОДЕРЫ С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ.....	148
Лазарчук А. И., Кисель В. Э. КРИСТАЛЛ $\text{Yb:Gd}_{1.615}\text{Y}_{0.385}\text{SiO}_5$ КАК АКТИВНАЯ СРЕДА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ.....	150
Лазарчук А. И., Шишко Т. А., Кисель В. Э. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКОННОГО РЕФЛЕКТОРА КАК НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ	152
Лазарчук А. И., Юмашев. К.В., Герцова А.В., Кисель В. Э. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ В КРИСТАЛЛАХ $\text{Yb}^{3+}:\text{Gd}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$	154
Литвинович Г.С., Ломако А.А., Ивуть П.В., Хомицевич А.Д. РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛЕТНОЙ СИСТЕМЫ (ГАЛС) НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРА ОФФНЕРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА С БОРТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	155
Луцкович З.М., Федорцев Р.В. ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ	157
Маляревич А.М., Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Юмашев К.В., Дымищ О.С., Алексеева И.П., Жохова Ю.Р., Жилин А.А. ПАССИВНЫЙ ЗАТВОР НА ОСНОВЕ СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ Fe^{2+}	159
Морозов Р. Р., Белов Ю. В., Есикова Н. А., Белов Д. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПРОБ В РЕАКТОРАХ МИКРОФЛЮИДНЫХ УСТРОЙСТВ.....	161
Невдах В.В. ВОЗМОЖНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СВЕТА НЕРАВНОВЕСНОЙ СРЕДОЙ БЕЗ АБСОЛЮТНОЙ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ.....	162
Орда В.В., Федорцев Р.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ДАЛЬНОМЕРОВ.....	164
Савкова Е.Н. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	166
Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Шестовский Д.В., Явид В.Ю., Янковский Ю.Н., Исмаилов Б.К., Кенжаев З.Т., Черный В.В. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ p-i-n-ФОТОДИОДОВ С ГЕТТЕРАМИ, СОЗДАНЫМИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ СУРЬМЫ	168
Свибкович И. В., Шкадаревич А.П., Сафонов В.В., Радченко И.М., Кисель В.Э. АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛА МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	170
Сидлеров Д.Ю., Микитчук К.Б., Чижев А.Л. ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ НЕСКОЛЬКИХ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ РАДИОФОТОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ «ЧАСТОТА – ВРЕМЯ».....	172

Суринович Е.И., Кисель В.Э. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ И ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНЗ	174
Федорцев Р.В., Конопляников А.А., Горбач Д.В., Колоницкая В.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА КРОМКЕ ТОКАРНОГО РЕЗЦА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	175
Чиж Н.А., Микитчук К. Б. МОЩНЫЙ ФОТОДИОДНЫЙ МОДУЛЬ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 20 ГГц С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛЕНИЕМ	177
Чиликина П.А. СПЕКТРАЛЬНО – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ С КАПИЛЛЯРНЫМ РАЗРЯДОМ В КСЕНОНЕ	179
Шавель С. С., Горобец В. А., Бушук С. Б. МНОВОВОЛНОВОЙ ТЕА ЛАЗЕР С КОМБИНИРОВАННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ ГЕНЕРАЦИИ	181
Шанчук В. А., Артюхина Н. К., Чергейко С. В. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	183
Шевченко В.П., Артюхина Н.К. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА	185
Шейко А.Г., Артюхина Н.К. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕТОДИОДНОЙ ФАРЕ	186
Шишко Т. А., Кисель В. Э., Лазарчук А. И. СИСТЕМА РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$	188
Юмашев К. В. АП-КОНВЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ- И ЛЮТЕЦИЙ-АЛЮМИНИЕВЫХ ГРАНАТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ	190
Ясюкевич А.С., Колобкова Е.В., Кисель В.Э. ФТОР-ФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА С ИОНАМИ Yb^{3+} И Ho^{3+} КАК ЭФФЕКТИВНЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ В ЖЕЛТО-ЗЕЛЕННОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА	192
Лагунович Н. Л. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ P-N-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GAAS	194
Шакин О.В., Казаков В.И., Белый В.Н., Ропот П.И., Кулак Г.В. АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ КВАЗИБЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ПУЧКОВ	196

Секция 3. БИМЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

Аниско Л.А., Щербакова Е.Н. ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗАТОРА ACL TOP 750 В ВЫЯВЛЕНИИ МАРКЕРОВ ГИПЕРКОАГУЛЯЦИИ ПРИ COVID-19	198
Анишиц А.А., Бодяк Д.А., Минченя В.Т., Савченко А.Л. ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ И ПЕСКОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАЛЕНИЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ С ПОВЕРХНОСТИ НИТИНОЛОВЫХ СТЕНТОВ	200
Журкевич М. В., Калинин А. Ю. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА РАЗРАБОТКИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ	202
Ильин Е. А., Белов Д. А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ПТО-СТРУКТУРАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПАХ	204
Левоненко Ю. И., Лукьянов А. В., Кудина А.В., Габец В.Л. 3-D ПРОТЕЗИРОВАНИЕ ВЕРХНИХ И НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ	205
Магруппов Т.М., Ахмаджонов Р.Р., Носиров М.У., Раджабов А.Г. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ЛЕГОЧНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ ОСНОВАННЫЙ НА СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ	207
Розов Д.В., Бодяк Д.А., Минченя В.Т., Савченко А.Л. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРИМПИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ МАРКЕРОВ ВО ВНУТРИСОСУДИСТЫЕ ИМПЛАНТАТЫ	209
Маркин Д.Н., Минченя В.Т., Глазов И.Е., Савченко А.Л. ГРАДИЕНТНЫЕ ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ	211
Рутковская В. М., Доронь А. Е., Кудина А.В., Габец В.Л. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ	213

<i>Савченко А. Л., Смольский А. А.</i> УСТАНОВКА ДЛЯ СТРЕЛКОВОЙ ПОДГОТОВКИ БИАТЛОНISTОВ	214
<i>Савченко А. Л., Богдан П. С., Кондратьева Н. А., Шумская А. П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРА-ЛОВУШКИ	216
<i>Сидоренко К. Р., Вершина Г. А.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИТИ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА РЕЗАНИЕМ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКОГО ФЕТРА.....	218
<i>Степаненко А. И., Савченко А. Л.</i> ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АППАРАТА ТЕРМОМАГНИТОТЕРАПИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ	220

Секция 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

<i>Абрамов С. А., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Zubova O. A., Черный В. В., Вабищевич С. А.</i> ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ	222
<i>Алтынбаев Е. В., Гоголинский К. В., Гуревич В. Л., Хейфец М. Л.</i> ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ НЕЙТРОННЫХ И СИНХРОТРОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	224
<i>Алтынбаев Е. В., Гоголинский К. В.</i> ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ.....	225
<i>Антошин А. А., Галузо В. Е., Шалик А. А.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ	226
<i>Антошин А. А., Галузо В. Е., Калита Е. В.</i> ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПАСПОРТИЗАЦИИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ	227
<i>Асадчая Д. Ю., Соломахо В. Л.</i> АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ ДОЗИМЕТРИИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА – ИЗЛУЧЕНИЯ	229
<i>Бусько В. Н., Свиблов И. В., Бурдо М. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ СТРЕЛОК ПО ДАННЫМ МАГНИТОШУМОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ	231
<i>Ванцева М. С., Серенков П. С.</i> FMEA КАК ИНСТРУМЕНТ ПОИСКА СКРЫТЫХ ПОТЕРЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	233
<i>Гузкова Ю. А., Давыдова Е. А., Алексеевич А. О.</i> МАРКИРОВКА ТОВАРОВ СРЕДСТВАМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ	235
<i>Гуринович А. А., Серенков П. С.</i> РАЗРАБОТКА АГОРИТМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОТНОШЕНИИ ПРИОРИТИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ	237
<i>Давыдова Е. А., Фильченко Н. Т.</i> ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	238
<i>Дербенев В. В., Соломахо В. Л.</i> РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ И ИСПЫТАНИЯМ ДЫМОВЫХ ТРУБ НА КЛАСС ПО ДАВЛЕНИЮ И АККРЕДИТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ	240
<i>Дубейко С. В., Коробко Ю. С.</i> МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА	241
<i>Дубейко С. В., Коробко Ю. С.</i> НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА TRIAX ...	243
<i>Качанова Ю. И., Серенков П. С.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ РИСКА ПРОЦЕССА ИНСПЕКЦИИ В ПИЩЕВОЙ ОТРАСЛИ	245
<i>Кубрин Д. С., Гомма М. А.</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАТРАТ	247
<i>Кубрин Д. С., Николайчик Ю. А., Серенков П. С.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ	248
<i>Кубрин Д. С., Николайчик Ю. А., Серенков П. С.</i> ПРОБЛЕМА НЕСОГЛАСОВАННОСТИ МНЕНИЙ В ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОПРЕДЕЛЕНИИ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ	250
<i>Кудина А. В., Франко Е. П., Есьман Г. А., Углонова Е. Р.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	252

<i>Липаткина Т.Н., Серенков П.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ	254
<i>Лужинская А.И., Кисляков Н.Н., Гомма М.А.</i> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	256
<i>Лужинская А.И., Серенков П.С., Романчук В.М.</i> МЕТОД АЛЬТЕРНАТИВ ДЛЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК: ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ.....	257
<i>Митюшина Ю.С., Серенков П.С.</i> СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРИЕМОЧНОГО КОНТРОЛЯ ФАСОВАННЫХ ТОВАРОВ.....	259
<i>Лужинская А.И., Серенков П.С., Романчук В.М.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АЛЬТЕРНАТИВ	261
<i>Панько В.В., Соколовский С.С.</i> КАЛИБРОВКА НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	263
<i>Пряник И., Давыдова Е.А., Чуешков В.В.</i> ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО МЕНЕДЖМЕНТА В СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ПРЕДПРИЯТИЙ.....	265
<i>Сафроненкова В.С., Давыдова Е.А.</i> АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	266
<i>Сандомирский С.Г.</i> АНАЛИЗ ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО ИХ МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ И ПОСТРОЕННОГО НА ЕГО ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	268
<i>Селятыцкий А.А., Гомма М.А.</i> ИНТЕГРАЦИЯ IT-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	270
<i>Селятыцкий А.А., Серенков П.С., Романчук В.М.</i> АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	272
<i>Селятыцкий А.А., Серенков П.С., Романчук В.М.</i> КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	273
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Тадэуш Н.Н., Федорцев Р.В., Коничева Л.М.</i> СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ПРИБОРОВ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	275
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Тадэуш Н.Н., Федорцев Р.В., Коничева Л.М.</i> ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ СОВРЕМЕННЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	277
<i>Серякова А.В., Токарь О.В.</i> РАЗРАБОТКА ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ НА ОСНОВЕ ДОКУМЕНТАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ	279
<i>Соломахо В.Л., Жук Т.А.</i> АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ДЕКОРАТИВНОЙ КОСМЕТИКИ.....	281
<i>Спесивцева Ю.Б., Кубрин Д.С., Лужинская А.И., Кисляков Н.Н.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ДОПУСКОВ НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ	282
<i>Спесивцева Ю.Б., Кубрин Д.С., Лужинская А.И., Кисляков Н.Н.</i> РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ И ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.....	284
<i>Старовойтова В.Г., Серенков П.С.</i> ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ	286
<i>Степура В.С., Виноградова А.В., Исаевич А.В.</i> ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ШУМ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	288
<i>Хадыков М.Т., Соколова Ю.А.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОЗЫРЕК ЛЕВЫЙ»	290
<i>Цитович Б.В., Соколовский С.С.</i> АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	291
<i>Цитович Б.В., Соломахо В.Л.</i> МЕРЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СФЕРЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ МЕТРОЛОГИИ.....	293
<i>Черник М.О., Токарь О.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	295

Мороз А.С., Фролов Н.Н., Тявловский А. К., Ломтев А. А. ПРОБЛЕМЫ И ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ТЕРМОПАР	297

Секция 5. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Баев А.Р., Воробей А.В., Асадчая М.В., Гиль Н.Н. ДИСТАНЦИОННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ВРАЩАЮЩИМИСЯ МОДАМИ	299
Бакина Е.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ	301
Балухо И.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н. МОДЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	302
Балухо И.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н. ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ ПО СЕТИ ИНТЕРНЕТ К СРЕДСТВАМ УПРАВЛЕНИЯ 2-D РЕНТГЕНОВСКОЙ КАМЕРОЙ.....	304
Бобученко Д.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СПЕКТР КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ	306
Бокуть Л.В., Деев Н.А. ВЫБОР СИГНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ С КАНАЛОМ ОПОВЕЩЕНИЯ ПО СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	308
Борздов А.В., Борздов В.М., Буйновский Д.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННОГО КРЕМНИЕВОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА	310
Доронин К.И., Уманский А.С., Гоголинский К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ	312
Жевняк О.Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО РАСТЕКАНИЯ ЛИНИЙ ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ	314
Забогонский К.А., Шадурская Л.И., Воробей Р. И., Гусев О. К. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАЦИОНАРНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО НА ЯЗЫКЕ PYTHON	315
Забогонский К.А., Шадурская Л.И., Свистун А. И., Самарина А. В. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ	317
Защепко П.А., Зайцева В.А., Данильченко А.Ю., Федорцев Р.В. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДУЛЕЙ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ СНИМКОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	319
Зикеев К.А., Бурак В.А. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 30ХГСА ПО СТАНДАРТНЫМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ	322
Иоффе К.В., Монич С.Г. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КЛЕЙКИХ ЛЕНТ.....	323
Каменев З.А., Семенов Н.С., Монич С.Г. УСТРОЙСТВО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА ДЛЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА.....	325
Князев М.А., Блинкова Н.Г. ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН ВСЛЕДСТВИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ	327
Книга Н.А., Савелов И.Н. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИЙ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	329
Князев М.А. ТОПОЛОГИЧЕСКИ НЕТРИВИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ В МОДЕЛИ φ^4 С НАРУШЕНИЕМ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ И УЧЕТЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ	330
Колонтаева Т.В., Сергеевич О.А., Гвоздева Н.А. ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА	332
Колонтаева Т.В., Сергеевич О.А. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ	334

Колядко Я.А., Шадурская Л.И., Гусев О. К., Воробей Р. И., Свистун А. И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФфуЗИИ С УЧЕТОМ ИНЖЕКЦИОННОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ГЛУБОКИХ ПРИМЕСЕЙ.....	336
Крень А.П., Никифоров А.В., Турсунов Н.К., Уразбаев Т.Т., Мацулевич О.В., Протасеня Т.А., Баев А.Р., Бурнос А.Ю. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУГУНА.....	337
Кудина А.В., Франко Е.П., Габеев В.Л. ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К НЕИСПРАВНОСТЯМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	339
Кулагин В.Н., Бурак В.А., Осипов А.А. СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ 12ХН3А	341
Лисенков Б.Н., Сидорик О.В. ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ	343
Латий О.О., Буслюк В.В., Дереченник С.С., Емельянов В.А., Кочергина О.В., Оджаев В.Б., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Черный В.В. ШУМОВЫЕ ДИОДЫ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ	345
Луговой В.П., Попов Р.А. ПЛАНЕТАРНАЯ ДОВОДКА ШАРИКОВ ИЗ КАМНЕСАМОЦВЕТНОГО СЫРЬЯ.....	347
Луговой В.П., Попов Р.А. СПОСОБ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	348
Медведев Н.В. КОРРЕЛЯЦИЯ СОБЫТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ В SIEM СИСТЕМЕ	350
Мирошников В.В., Гречишкина Н.В., Неделько А.А. НОВЫЙ УРОВЕНЬ МАГНИТОКАРДИОГРАФИИ.....	352
Невдах В.В. О ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ БЕГУЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ.....	354
Пилипенко В.А., Анищик В.М., Понарядов В.В., Жигулин Д.В., Шестовский Д.В. ПРИМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕМ ПОСЛЕ БЫСТРОГО И ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА	356
Романчук В.М., Прусова И.В. ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЧИСЛОВЫХ СИСТЕМ В ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	358
Самцов М.П., Тарасов Д.С., Радько А.Е., Шевченко К.А., Кирсанов А.А., Лабода Н.В., Воронай Е.С. СПЕКТРОФЛУОРИМЕТР ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КИНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	359
Сергиевич О.А., Колонтаева Т.В., Станчук А.А. ХИМИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3-SiO_2$	361
Таболитч Т.Г., Петрович А.Г. РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЦЕЛЯХ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКТА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМС В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ И ПИТАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.....	363
Телеш Е.В., Сафронов Н.В., Перепечко Е.Ю., Курбако Е.Г. НОВЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА	365
Францкевич А.В., Францкевич Н.В., Мартинович В.А. МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ В DC ПЛАЗМЕ ВОДОРОДА.....	367
Шевель Н.А., Бурак В.А. ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ПЛАСТИКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	369
Юшкевич Е.Д., Кураков И.А., Борейко Д.А., Ильюшенко А.С., Шкурская Ю.А., Баранова В.С., Спиридонов А.А., Ушаков Д.В., Саечников В.А. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ГРУППИРОВКИ СВЕРХМАЛЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЗОНДОВ	371
Реутская О.Г., Войцеховский А.А., Князев М.А. ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ ТЕНЗО- И ВИБРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	372
Микитевич В. А., Протасеня Т. А., Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В., Тявловский А. К., Жарин А. Л., Самарина А. В., Крень А. П., Мацулевич О. В. ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	374

<i>Микитевич В. А., Мацулевич О. В., Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В., Тявловский А. К., Жарин А. Л., Самарина А. В., Крень А. П., Протасеня Т. А.</i> АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	376

Section 6. SHAPING INDUSTRY 5.0: THE SYNERGY OF INTELLIGENT AUTOMATION, DIGITAL COMMUNICATION & ADVANCED ELECTRONICS FOR A SUSTAINABLE SMART FUTURE

<i>Musiiwa P.B., Muredzi P., Kanhukamwe Q.C., Makusha D.T., Rushambwa M.C., Chimonyo K.B.</i> TWO DECADES OF SHAPING ADAPTIVE ELECTRONIC ENGINEERS FOR SUSTAINABLE INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DIGITAL TRANSFORMATION: THE CASE OF THE ELECTRONIC ENGINEERING DEPARTMENT AT HARARE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZIMBABWE	378
<i>Ruvimbo Samantha Chahwanda, Lovemore Gunda</i> AN ICT-ENABLED UNDERGROUND MINE SAFETY SYSTEM FOR COLLISION AVOIDANCE AND REAL TIME TRACKING	381
<i>Pius Matemarunda, Sam Masunda, Silence Madondo</i> EARLY CATTLE DISEASE AND OESTRUS CYCLE DETECTION USING IOT	383
<i>Munyanduri Tapiwanashe P., Makusha Didymus T., Chimonyo K.B., Rushambwa M.C.</i> A REVIEW OF MODERN INTELLIGENT AND ENERGY-EFFICIENT TOBACCO CURING SYSTEM	384
<i>Last E Jinya, Doubt Simango, Musaidzi H., Makusha D.T.</i> IMPLEMENTATION OF ROBOTICS IN IMPROVING SAFETY AND EFFICIENCY IN MINING OPERATIONS	386
<i>Didymus T. Makusha, Hazel V. Makuwa, Tapiwanashe Munyanduri, Rushambwa M.C., Chimonyo K.B.</i> DESIGN AND EVALUATION OF A GPS-GSM BASED IOT TRACKING DEVICE FOR PERSONAL AND ASSET TRACKING	387
<i>Dzapasi T.D., Chimonyo K.B., Duri R.</i> A PRAGMATIC AND ITERATIVE FRAMEWORK FOR MODERN EMBEDDED SYSTEMS PRODUCT DESIGN: A CASE STUDY OF A LORA-BASED SMART CITY TECHNOLOGY ENABLER.....	389
<i>Shemiyadi Purazeni, Didymus T. Makusha, Rushambwa M.C., Chimonyo K.B.</i> INTEGRATED POULTRY ENVIRONMENTAL MONITORING AND CONTROL SYSTEM WITH GSM ALERTS.....	390
<i>William Takudzwa Charewa, Rudo Duri</i> SOLAR POWER OPTIMIZATION - CASE STUDY	392
<i>Lusani Y. Ndlovu, Kudzai B. Chimonyo, Tanaka Dzapasi, Didymus T. Makusha</i> SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER FOR MPPT CHARGE CONTROLLER.....	394
<i>Kudzai B. Chimonyo, Munyaradzi C. Rushambwa, Didmus T. Makusha, Rajkumar Planniapan, Peter Bukelani Musiiwa</i> OPTIMIZATION AND EFFICIENCY IMPROVEMENT OF RECTIFIERS WITH INTERPHASE TRANSFORMER	396
<i>Chamunorwa T., Musiiwa P.B., Zvavashe T., Rushambwa M.C., Tyavlovsky A., Svistun A.I.</i> A PARALLEL VIRTUAL INSTRUMENTATION FRAMEWORK FOR IMPROVING DIAGNOSTIC EFFICIENCY IN BED-OF-NAILS TESTERS	397
<i>Munyaradzi Charles Rushambwa, Tatenda Murembeni, Peter Bukelani Musiiwa, Rajkumar Palanniapan, Vikneswaran Vijejan</i> DESIGN AND CONSTRUCTION OF 12V DC TO 220V AC POWER INVERTER.....	399
<i>Gashirai Jakopo, Simbarashe Magidi</i> SECURE MESH NETWORKING CHIP DESIGNS FOR RESILIENT IOT AND MOBILE SYSTEMS	403
<i>Takunda Stanley Pambayi, Victor Kuno</i> METEOROLOGICAL FRAMEWORK FOR QUALITY ENHANCEMENT IN LEAD-ACID BATTERY GRID MANUFACTURING AND PERFORMANCE ASSURANCE	404
<i>Million E., Govha J., Musiwa P.B.</i> FROM SAND TO SILICON: UNLOCKING THE SEMICONDUCTOR INDUSTRY POTENTIAL FOR ZIMBABWE'S SILICA SAND	406
<i>Mbanje N., Govha J., Musiwa P.B.</i> THE NEXT FRONTIER: TRANSFORMING ZIMBABWE'S SILICA SAND INTO SMART TECHNOLOGY	407
<i>Machongwe T., Musiiwa P.B., Mutamba C.T., Makusha D.T., Kapuya E.T., Musademba D.</i> EFFECTS OF DEAD-TIME IN DUAL ACTIVE BRIDGE	408
<i>Mutamba C.T., Musiiwa P.B., Machongwe T., Chimonyo K.B., Kapuya E.T., Musademba D.</i> EFFECTS OF PHASE SHIFTING IN DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB) CONVERTERS.....	409

<i>Mukwewa T.M., Musiiwa P.B., Zwavashe T., Rushambwa M.C., Makusha D.T., Chimonyo K.B.</i> WEARABLE RADIATION DETECTION SYSTEM FOR ZIMBABWE AIRPORTS	411
<i>Mutsata K., Govha J., Musiiwa P.B., Moyo L.</i> SUSTAINABLE RECOVERY OF HIGH-PURITY AMORPHOUS SILICA FROM LOCAL SAND DEPOSITS IN ZIMBABWE USING CITRIC ACID LEACHING PRE-TREATMENT	412
<i>Musiiwa P.B., Rushambwa M.C., Gwamuri J., Kanhukamwe Q.C., Tyavlovsky A., Svistun A.I.</i> AN INVESTIGATION INTO THE POWER-PERFORMANCE TRADE-OFF IN MEMRISTOR- AUGMENTED SENSE AMPLIFIERS FOR NANOSCALE SRAM	414
<i>Musiiwa P.B., Rushambwa M.C., Gwamuri J., Kanhukamwe Q.C., Tyavlovsky A., Svistun A.I.</i> THE SILICON SHIELD: A SYNERGISTIC, HARDWARE-ANCHORED ARCHITECTURE FOR NEXT-GENERATION CYBER RESILIENCE.....	416
<i>Mushiri T., Chikuruwo M.N.H., Dhliwayo S., Munjoma K., Chipfurwe Makoni B., Chikonobaya A., Chirere E., Jaya C., Mugutso I., Makomo J., Makumbe T., Mberi R., Njenje T., Hwendere C., Ranganai M., Maranga T., Sithole R., Chitiyo N., Borerwe A., Chita T.</i> IMPLEMENTATION OF ANDON IN A SEED PROCESSING PLANT FOR ENHANCED OPERATIONAL SUSTAINABILITY	418
<i>Makwara C., Mukwewa T.M., Musiiwa P.B., Zwavashe T., Rushambwa M.C.</i> EMOTION-AWARE WEARABLE DEVICES INTEGRATING BIOSIGNALS FOR MENTAL HEALTH MONITORING USING RANDOM FOREST ALGORITHM	419
<i>Kudzanayi Chiteka, Winnie Mutenhabundo, Rindai Mahoso</i> AI-DRIVEN INSTRUMENTATION FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF SOLAR PV AND THERMAL COLLECTORS IN SMART GRIDS	421
<i>Kudzanai Chabara, Simbarashe Magidi</i> FREE-SPACE OPTICS BACKHAUL: A STRATEGIC NECESSITY FOR 5G AND 6G ROLLOUT WITHIN ZIMBABWE'S EMERGING TELECOM ENVIRONMENT.....	422
<i>Nigel Farai Kadzinga, Munyaradzi Charles Rushambwa, Peter Musiiwa, Rajkumar Palaniappan, Vikneswaran Vijean</i> CLOUD-NATIVE 5G STANDALONE CORE WITH AWS-POWERED AI/ML ANALYTICS: ENHANCING TELECOM SCALABILITY AND INTELLIGENCE	424
<i>Rajkumar Palaniappan, Munyaradzi Charles Rushambwa, Vikneswaran Vijean, Talon Garikayi</i> AUTOMATING EDUCATIONAL PROCESSES: BOOSTING LEARNING EFFECTIVENESS AND STUDENT ENGAGEMENT.....	425
<i>Tinotenda Mzembi, Munyaradzi Rushambwa, Peter Musiiwa, Rajkumar Palaniappan, Vikneswaran Vijean</i> MINI REVIEW OF PRECISION AGRICULTURE, INTEGRATED SENSOR NETWORKS AND AI TECHNOLOGIES IN MITIGATING WATER SCARCITY IN ZIMBABWEAN AGRICULTURE.....	427
<i>Tamasha Chirimhanzi, Rudo Duri</i> ADVANCED MOTION PLANNING FOR REAL-TIME AND SCALABLE AUTONOMOUS SYSTEMS IN HIGH-DIMENSIONAL ENVIRONMENTS	430
<i>Sean T. Muchenje, D. Simango, D. T. Makusha, Brian Sibanda</i> AUTONOMOUS ASSISTIVE EXOSKELETON CONTROL SYSTEM INTEGRATING EEG/EMG INTENT DECODING	432
<i>Winnie Mutenhabundo, Kudzanayi Chiteka, Rindai Mahoso, Munyaradzi Mupona</i> HEALTHCARE 4.0 TECHNOLOGIES FOR PATIENT TRANSFER IN OPERATING THEATRES: A SYSTEMATIC REVIEW.....	433
<i>Musiiwa F., Nyaude P.</i> THE IMPERATIVE OF QUALITY ASSURANCE: ENHANCING ENGAGEMENT AND RETENTION OF GENERATION Z IN ONLINE ENGINEERING EDUCATION.....	434
<i>Panashe G. Mahungwe, Doubt Simango, Makusha D. T., Musaidzi H.</i> AI AND COMPUTER VISION- BASED PEST AND DISEASE DETECTION FOR GREENHOUSE CROPS IN ZIMBABWE	436
<i>Marandure S.U., Marandure P.</i> LEVERAGING ADDITIVE MANUFACTURING FOR ENHANCED MINE SAFETY: A COMPARATIVE REVIEW AND EXPERIMENTAL PLAN	438
<i>Denzel C. Ndavambi, Kelvin Chihota, Doubt Simango, Makusha D.T.</i> AUTONOMOUS DISINFECTION ROBOT WITH ROBOTIC ARM FOR PRECISION CLEANING	439
<i>Muchena M., Pondani T., Amos F., Chireshe H.</i> DESIGN AND PROTOTYPING OF A LOW-COST MYOELECTRIC-CONTROLLED PROSTHETIC HAND	440

<i>Chinyuku L., Pondani T., Chireshe H., Ngwenya P.</i> DESIGN AND PROTOTYPING OF A WEARABLE PATIENT MONITOR FOR HIGH DEPENDENCY UNIT (HDU)	441
<i>Tendai P Nyebera, Kudzai B. Chimonyo</i> DRIVER DISTRACTION DETECTION SYSTEM USING VISUAL SENSORS BASED ON DEEP LEARNING	443
<i>Palmer Dhliwayo, Musiiwa P.B., Kapuya E.T., Musademba D.</i> DYNAMIC PHASE ANGLE AND DEAD-TIME COMPENSATION FOR HIGH-EFFICIENCY DUAL ACTIVE BRIDGE CONVERTERS	445
<i>Nyambayo T.C., Musiiwa P.B., Kapuya E.T., Musademba D.</i> PHASE ANGLE AND DEAD TIME IN DUAL ACTIVE BRIDGE DESIGNS FOR ELECTRIC VEHICLES AND SOLAR CHARGE INVERTERS	446
<i>Munyaradzi Innocent Mupona, Mutsa Chirasha</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIRECTIONAL FORCE TRANSMISSIBILITY AND MEASUREMENT ACCURACY IN FORCE-TRANSDUCER-BASED DYNAMOMETER SYSTEMS UNDER RANDOM EXCITATION	448
<i>Patson Ngoshi, Kudzai Chimonyo</i> DESIGN OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM TO ENHANCE RELIABILITY IN REMOTE MONITORING WITH CONTROL FOR ZETDC BULK SUPPLY POINTS DC SUPPLIES FOCUSING ON TELECOMMUNICATIONS AND PROTECTION DC SYSTEMS	450
<i>Manas S. Sonawane, Dipak P. Patil, Akhilesh Kumar, Svetlin Antoniv</i> AI DETECTION OF DRUG ACTIVITY IN TELEGRAM BOTS AND GROUPS FOR SECURITY APPLICATIONS	452
<i>Amit Kumar Mishra, Dr Dipak P Patil, Puneet Jain</i> DESIGN AND DEVELOPMENT OF BRAIN - COMPUTER INTERFACE SYSTEM USING INTERNET OF THINGS	455
<i>Pramod S. Aswale, Dr. Dipak P Patil</i> DETECTING EMAIL SPAM OR HAM USING LOGISTIC REGRESSION AND STREMLIT DEPLOYMENT	457
<i>Реутская О. Г., Таратын И. А., Луданик Д. Ю., Койро А. В., Войтеховский А. А.</i> ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	459

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2025

Материалы
18-й Международной научно-технической конференции

13–15 ноября 2025 года
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *К. В. Пантелеев*
Оформление и компьютерная верстка *Д. Ю. Богдан, Н. Н. Ризноокая*

Подписано в печать 11.11.2025. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 54,87. Уч.-изд. л. 53,17. Тираж 100. Заказ 683.
Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.