

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БНТУ  
КАФЕДРА «РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ» БНТУ  
ЗАО «МИНСКЭКСПО»

**«Инновационные технологии, автоматизация и  
мехатроника в машино- и приборостроении»**

совместно с МинскЭкспо  
в рамках выставки «Автоматизация, электроника – 2026»

Материалы XIV международной научно-практической конференции

(Минск, 18 марта 2026 года)

Минск  
2026

УДК 658.51:004(082)  
ББК 32.965я43

Редакционная коллегия:

Бородуля А.В. (главный редактор), Дербан А.Н. (ответственный секретарь), Холод П.В., Заярный В.П.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. DETECTION OF SOLAR PANEL SURFACE DAMAGE USING AN IMAGE PROCESSING ALGORITHM Albagoush A.A. ....	7
2. THERMAL CONTROL OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR AGRICULTURAL UAVS Lin Q., Dubinin S.V. ....	9
3. THE ROLE OF CONTROL THEORY IN SPORTS AND DRONES Ronald M.O., Zayarny V.P. ....	11
4. ROBOTICS IN MEDICAL CARE Zayarny V.P., Anushika Jayasooriya.....	13
5. ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ Александровский С.В. ....	16
6. ОБУЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ ТУРКМЕНИСТАНА Аллабаева К.Б. ....	18
7. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ САПР ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОД АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВОМ Барышев А.А., Татур Е.Ю. ....	20
8. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ Барышев А.А., Татур Е.Ю. ....	22
9. ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПСИХОСОЦИАЛЬНОГО АНКЕТИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ БНТУ Белова С.В., Киянко М.В., Толкач И.В. ....	24
10. СЕТЕВАЯ АДАПТИВНАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА CATS Белова С.В., Кондратенок Е.В. ....	25
11. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАГРЕВА ТВЧ Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Курилёнок А.А. ....	26
12. СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО РАСКРОЯ ПОЛОТНА ТИПА «ЛЕТАЮЩАЯ ПИЛА» Благодаров К.Е., Марченко И.С., Гагаков Ю.В., Карпеленя А.Ю., Козел А.Д. ....	28
13. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ Васильев С. В. ....	30
14. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКА В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ НУЖД 3D-ПЕЧАТИ Веренич Е.А., Позднякова А.И., Прохорович С. С., Очеретний А.М., Гриневич А.И. ....	32
15. ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕГРУЗКИ Воюш Н.В., Германович А.П., Данильчик А.А. ....	34
16. ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛЭП В ГЕОИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА Воюш Н.В., Кравченко В.В., Королева М.Н., Сухобокков А.А. ....	36
17. ГИБРИДНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ Гу Пэнхао ....	38

18. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	
Гу Пэнхао .....	39
19. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ	
Гутич И.И., Матрунчик Ю.Н., Жерко В.Е. ....	40
20. УНИФИЦИРОВАННЫЙ ФОРМАТ ОПИСАНИЯ РОБОТОВ (URDF)	
Дербан А.Н., Бусько А.М. ....	42
21. ЛЕГКОВЕСНЫЙ ПРОТОКОЛ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСПРЕДЛЕННЫХ СИСТЕМ	
Дербан А.Н., Бусько А.М. ....	43
22. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В ВЕТЕРИНАРИИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА	
Долгий А.А., Нитиевский С.А. ....	44
23. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ТОПЛИВО-СЖИГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ	
Емельяничков В.И., Опейко О.Ф., Елисеенко Ю.Ю. ....	46
24. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ	
Жук А.Н., Власов В.В., Шаталов И.М. ....	48
25. ТРЁХКОМПОНЕНТНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ	
Журавлёва Е.Р. ....	51
26. ИММОБИЛАЙЗЕР – ЗАЩИТА, МЕШАЮЩАЯ УДОБСТВУ	
Заярный В.П., Кляшторный А.А., Погуляев Т.М. ....	53
27. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ	
Иванов А.И., Королёв А.Ю. ....	56
28. ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ	
Качанов И.В., Жук А.Н., Ленкевич С.А. ....	58
29. СТРУКТУРА И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ	
Королёв А.Ю., Нисс В.С. ....	61
30. ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ТОРГОВОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ	
Кравец Д.Т., Прохорович С. С., Мальцев В. Л., Гриневич А. И. ....	63
31. МЕТОД НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ НА БАЗЕ ОБОБЩЕННОГО РЕГУЛЯТОРА	
Кулаков А.Т., Кулаков Г.Т., Ковалев В.А. ....	65
32. СИНТЕЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА	
Кулаков Г.Т., Воюш Н.В. ....	69
33. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ СИНТЕЗА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	
Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В. ....	72

34. ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ Лобатый А.А. ....	76
35. АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА INOVANCE НА ОСНОВЕ ДАННЫХ САМ- СИСТЕМЫ SPRUTCAM Марченко И.С., Германович А.П., Данильчик А.А. ....	77
36. ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ СИМУЛИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ 3Д-МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА Марченко И.С., Данильчик А.А., Германович А.П., Щеклеина В.П. ....	79
37. ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ШЕСТИОСЕВЫХ РОБОТОВ Марченко И.С., Леоник П.Д., Щеклеина В.П. ....	81
38. МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С СЕДЬМОЙ ОСЬЮ ЧЕРЕЗ ПЛК Марченко И.С., Серов М.П. ....	83
39. ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЛЕДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА ЗА КОНВЕЙЕРОМ Марченко И.С., Щекало М.Н. ....	85
40. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОТОКОЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ Марченко И.С., Ковалевский Р.В. ....	87
41. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА Матрунчик Ю.Н., Гутич И.И., Павлов М.И. ....	89
42. РТК НАНЕСЕНИЯ СИЛИКОНОВОГО УПЛОТНЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИЗДЕЛИЯ НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА Матрунчик Ю.Н., Шиш Е.Н. ....	91
43. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ Матрунчик Ю.Н., Шклёда Д.А. ....	93
44. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ Матрунчик Ю.Н., Прохорович С.С., Артемьев А.С., Волейко М.В. ....	95
45. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ Махнач Н.А., Качанов И.В., Жук А.Н. ....	97
46. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ РЕВЕРСИВНО- СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ Мезенцев А.М., Качанов И.В., Жук А.Н. ....	100
47. РЕАЛИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОТСЕВА ВЫБРОСОВ БОЛЬШОЙ ВЫБОРКИ Напрасников В.В., Напрасникова Ю.В., Соловьев А.Н. ....	103
48. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ Напрасников В.В., Бородуля А.В., Чжан Чжэньбан, Соловьев А.Н. ....	106
49. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОЙ СТОЙКИ ПРИ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКЕ Напрасников В.В., Жэнь И, Бородуля А.В., Соловьев А.Н. ....	109
50. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ Напрасников В.В., Чжан Чжэньбан, Бородуля А.В., Соловьев А.Н. ....	112

51. РАСПОЛОЖЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ НА МТФ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ КРС	
Немирович С.И. ....	114
52. МЕТОД СИНТЕЗА УСТОЙЧИВЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	
Несенчук А.А. ....	116
53. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
Нитиевский С.А. ....	118
54. АДАПТИВНОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	
Опейко О.Ф. ....	120
55. СТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА ZN-AL	
Орда Д.В., Сосновский И.А., Комаров А.И., Курилёнок А.А. ....	122
56. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ С КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ СВЯЗКОЙ И ДОБАВКАМИ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА	
Парницкий А.М., Мельник Ю.А. ....	124
57. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АСУ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ТУРКМЕНИСТАНЕ	
Пенджиев А., Бекмурзаев Б. ....	126
58. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ БЫТОВЫХ НЕПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И SCARA-МАНИПУЛЯТОРА	
Полупанова К.Д., Морозов С.А., Матрунчик Ю.Н., Гриневиц А.И. ....	128
59. СРАВНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНД РАЗРАБОТЧИКОВ	
Прихожий А.А., Козловская Ю.Б. ....	130
60. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САД-СИСТЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕРЬЕРА ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ	
Розов Д.В., Дубинин С.В. ....	132
61. ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ROS ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РОЕВОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ	
Руселевич Д.Д., Прохорович С.С. ....	134
62. МЕТОДИКА ТЕРМОГРАФИРОВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ КОРОВ	
Слимаков Д.Д., Гируцкий И.И. ....	136
63. ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.	
Страусов А.К., Ткаченко В.В. ....	138
64. ОПТИМИЗАЦИЯ КВАНТОВАНИЯ ЭМБЕДДИНГОВ В GOOGLE GEMINI	
Сушкевич Е.П., Прихожий А.А. ....	140
65. ЭЛЕКТРОПРИВОД СТЕРЖНЕВОЙ МЕЛЬНИЦЫ	
Цвирко Е.Э., Александровский С.В. ....	141
66. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРЕВЕНТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА	
Янкевич Н.С. ....	143

## DETECTION OF SOLAR PANEL SURFACE DAMAGE USING AN IMAGE PROCESSING ALGORITHM

**Albagoush A.A.**

Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

Solar panel surfaces can be damaged by falling small stones, hail, and cracks due to uneven temperature distribution. The presence of damage on the surface of a solar panel leads to a decrease in the amount of solar energy directly falling on the photocells, and, consequently, to a decrease in the power generation of this panel [1].

The developed by authors algorithm for processing the panel image [2] can be used to detect damage to solar panels. The algorithm includes the calculation of the difference between the clean panel image and the dusted panel image and than the calculation of sum of brightnesses of all pixels of this image. This sum of brightnesses can be used for making a decision of a pane cleaning start.

The effect of damage to the surface of a solar panel on its efficiency is similar to the effect of surface contamination. Therefore, by assessing the value of the total brightness of the difference image after cleaning the panel, it is possible to determine the presence and extent of damage. If there is damage on the surface of the panel, as shown in Figure 1, then after cleaning the panel from dust, the value of the total brightness of the difference image can be quite large, which indicates the presence of damage.

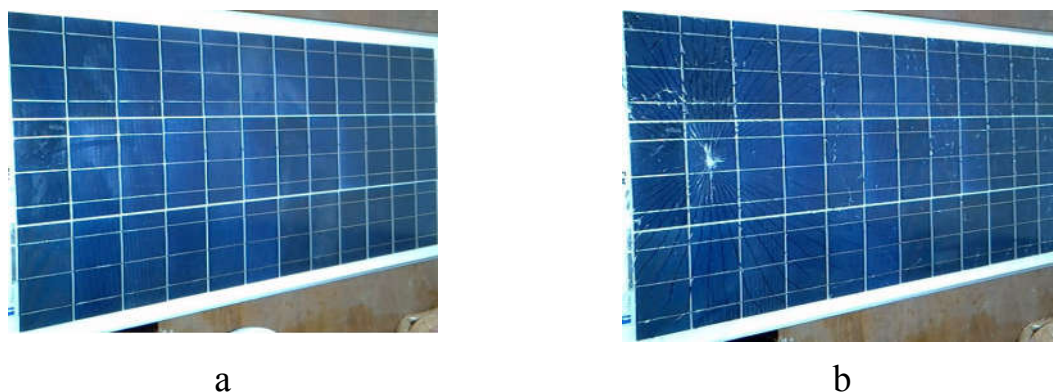


Figure 1. Undamaged (a) and damaged (b) solar panels images

The image of the difference between images of the undamaged and damaged panels is shown on the Figure 2.

Artificial lighting was used to ensure a constant level of illumination. The experiment was repeated and photographs were taken of undamaged and damaged panels at dust levels of 10, 20, 30 and 40 g/m<sup>2</sup>.

Figure 3 shows the dependence of overall brightness and brightness in color channels of the different image for the undamaged (a) and damaged (b) panels on the dust density.

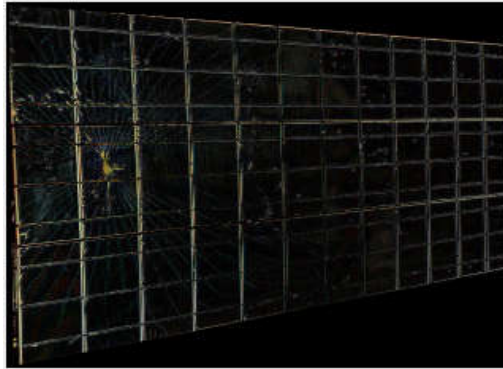


Figure 2 - The image of the difference of images the damaged and the undamaged panels.

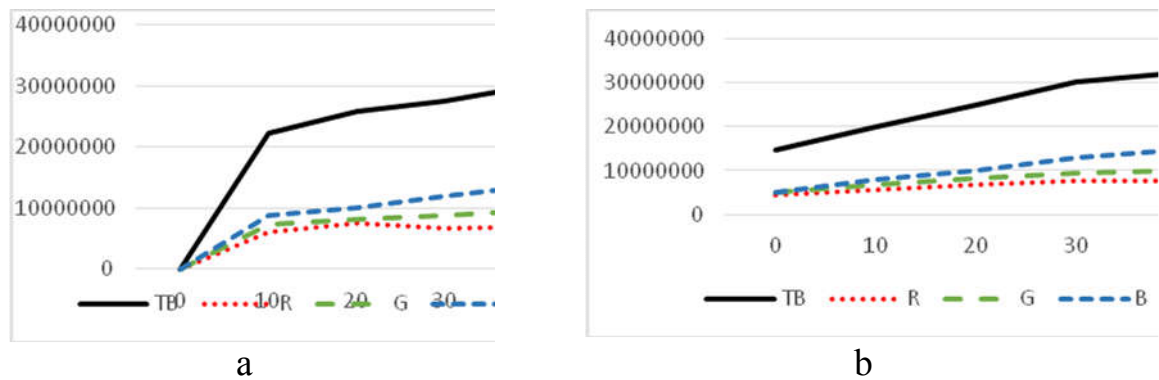


Figure 3 – Dependences of the values of the total brightness and brightness in the color channels on the dust density on the surface of the solar panel for the undamaged (a) and damaged (b) panels.

### Conclusion

- 1.Total brightness of the difference image of a solar panel can be used to detect damaged panels.
- 2.The condition of the panel (damaged vs. intact) significantly alters its baseline reflectance and its response to dust.

### References

1. Albagoush A.A., Kupriyanov A.B. Assessment of solar panel contamination via its image in Libya climate. «System analysis and applied information science». 2024;(4):41-46. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-4-41-46>
2. Albagoush A.A. Analysis of the operation of the algorithm for processing the image of a solar panel to assess its dustiness. «System analysis and applied information science». 2025;(1):32-36. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2025-1-32-36>

## **THERMAL CONTROL OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR AGRICULTURAL UAVS**

**Lin Q., Dubinin S.V.**

Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus

Thermal runaway is the primary safety hazard. High-current discharge in a high-temperature environment can easily trigger a chain of internal side reactions, leading to a sharp rise in temperature. At the same time, there is a contradiction between the demand for lightweighting and heat dissipation efficiency: the heat dissipation efficiency of traditional air-cooled systems drops by more than 35% at an ambient temperature of 40°C, while enhancing heat dissipation will increase the system weight and affect flight time.

At present, research on thermal management of drone batteries mainly focuses on two methods: passive cooling and active cooling [1].

(1) Passive heat dissipation: such as phase change material (PCM) wrapping, which alleviates temperature rise through heat absorption and release processes, but the material has limited heat capacity and is difficult to cope with long-term high load operations [2].

(2) Active cooling, such as wind cooling and liquid cooling, reduces battery temperature through forced convection, but consumes more energy and is not optimized in conjunction with discharge strategies, which may further shorten battery life. Active heat dissipation technology, represented by liquid cooling, can significantly improve heat dissipation uniformity through bionic flow channel design. Passive heat dissipation technology does not rely on external energy input, and mainly relies on technologies such as phase change materials and heat pipes for thermal management [3].

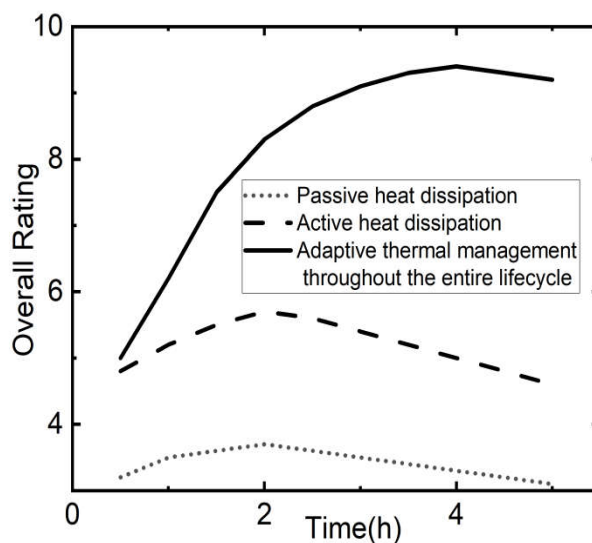
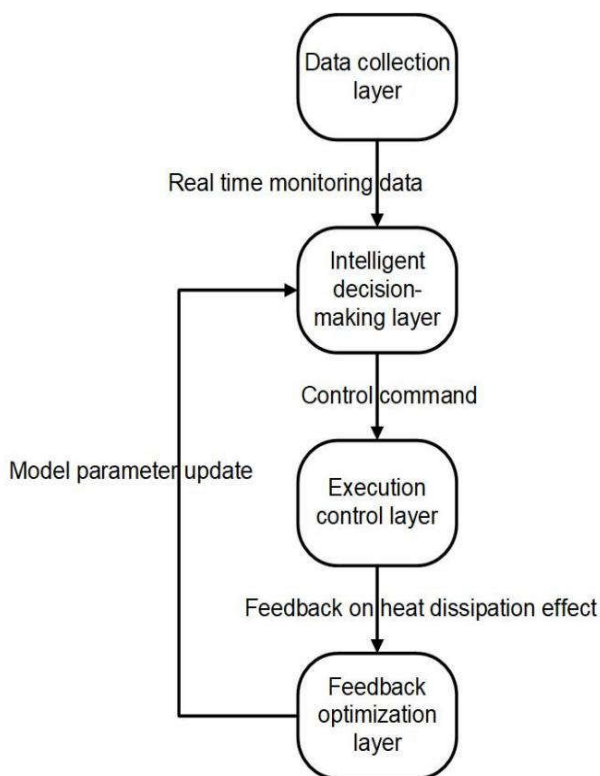
Lifecycle adaptive thermal management is a key direction for future development. Such systems can dynamically adjust thermal management strategies based on the battery's health status, environmental conditions, and mission requirements. The core lies in establishing a digital twin model of the battery's thermal behavior, enabling precise temperature control driven by real-time data.

This intelligent control system based on multi parameter feedback can significantly improve energy efficiency and extend battery life.

The future thermal management system architecture will achieve full-life-cycle adaptive regulation, and its system composition is shown in Figure 1.

This system collects real-time battery health status data through a multi-source sensor network and realizes multi-scale predictive thermal management regulation from cells to modules based on the digital twin model. At the same time, the performance evolution path of different thermal management technologies is shown in Figure 2.

Among them, traditional active and passive heat dissipation technologies mainly solve the temperature control problem under static working conditions, while full-life-cycle adaptive thermal management achieves optimal energy efficiency under dynamic working conditions, reaching the best balance between heat dissipation efficiency and system life.



1. Линь, Ц. Оптимизация и терморегулирование системы питания аккумуляторных батарей сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов / С.В. Дубинин, Л. Ву, К. Ванг, С. Ли, Ван К. // ИССТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА. 2025;(4):26-35.
2. Abbasi, R. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0 / R. Abbasi, P. Martinez, R. Ahmad // Smart Agricultural Technology. – 2022. – Vol.2. – P. 100042
3. Enhancing fast charging performance of lithium-ion batteries: The role of operating temperature and charging rate / W. Zheng, W. Xiaolan, B. Zhifeng, Y. Naixing, G. Guifang, B. Oluwatunmise Sharon // Electrochimica Acta. – 2025. – Vol.511. – P. 145390.

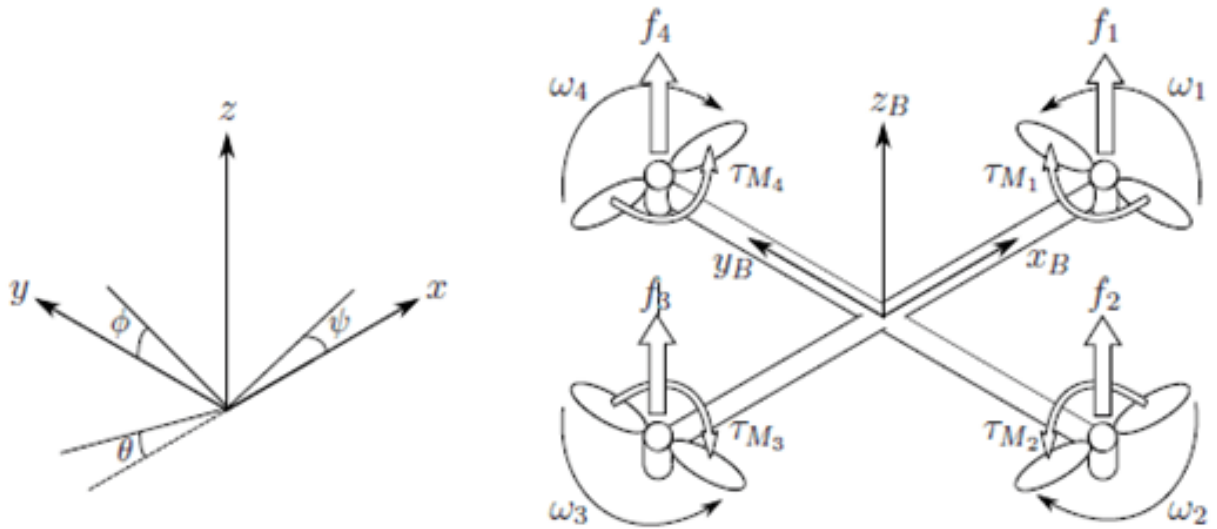
## THE ROLE OF CONTROL THEORY IN SPORTS AND DRONES

**Ronald M.O., Zayarny V.P.**

Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Control theory, a cornerstone of engineering and applied mathematics, studies how systems can be directed using feedback to achieve desired outputs. Though it originated in fields like robotics and electrical engineering, its applications have since spread into diverse domains—including sports and aerial robotics like drones. This article explores how control theory shapes both the physical performance of athletes and the technological prowess of modern drones. At its core, control theory revolves around managing dynamic systems using inputs, feedback, and control algorithms. The system receives an input, reacts to it, and produces an output. This output is measured and compared with a desired target (called the setpoint), and any difference (called the error) is used to adjust the input in a feedback loop. This framework applies broadly—from thermostats regulating room temperature to self-balancing robots and precision-guided missiles. In both sports and drones, the key lies in using real-time data to make continuous adjustments that enhance performance. In sports, athletes function as complex biological control systems. Muscles act as actuators, joints function as mechanical linkages, and the brain operates as a control center, processing sensory inputs from eyes, ears, and proprioceptive systems to adjust movement on the fly. Athletes rely on both **feedforward** and **feedback** control. Feedforward control is used when a player swings a bat or kicks a ball based on prior experience and training. Feedback control kicks in when a tennis player adjusts their grip or stance after a shot based on ball trajectory or balance cues. Modern sports science uses control theory to model these responses, particularly in rehabilitation, where wearable sensors monitor joint angles, force, and timing. Coaches and physiotherapists can assess how an athlete's control system adapts after injury or training. Technologies such as EMG (electromyography) and motion tracking provide data for real-time analysis. Athletes can use this biofeedback to improve performance—training their nervous system to optimize timing, precision, and muscle coordination. In drones, control theory governs flight dynamics, stability, and navigation. A drone is a classic example of a closed-loop system, where sensors and controllers continually adjust the motor outputs to maintain desired behavior. Drones are equipped with sensors such as GPS, inertial measurement units (IMUs), gyroscopes, and accelerometers. These sensors feed data into onboard microcontrollers, which calculate necessary corrections to the propeller speeds. This allows the drone to hover, rotate, climb, or descend with precision.



Picture 1. Mathematical model of UAV

Maintaining stable flight in a dynamic environment (wind, obstacles, user input) requires continuous control adjustments. Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers are commonly used to manage pitch, roll, yaw, and altitude. More advanced drones may employ Model Predictive Control (MPC) or adaptive control algorithms to handle uncertainty and optimize energy use. As drones evolve, control theory plays a critical role in enabling autonomous flight—such as obstacle avoidance, formation flying, and payload delivery. For example, delivery drones need to balance route efficiency with safety, requiring sophisticated control loops that account for GPS drift, object tracking, and sudden wind gusts.

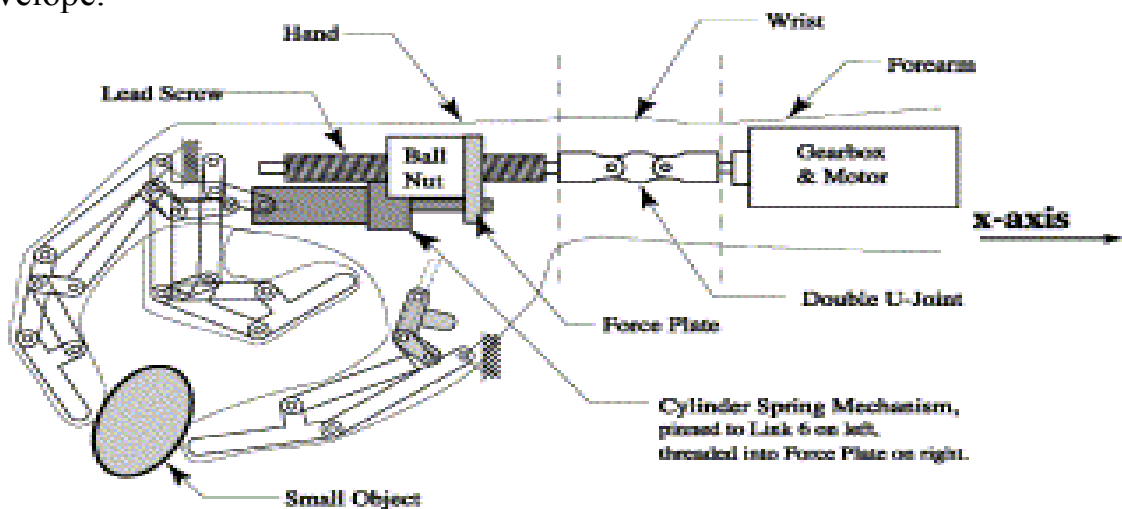
#### Reference

1. Nonlinear Systems – Hassan K. Khalil (for PID, LQR, and MPC theory), 2025.
2. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice – Randal W. Beard, Timothy W. McLain (covers UAV dynamics & control), 2026.

## ROBOTICS IN MEDICAL CARE

**Zayarny V.P., Anushika Jayasooriya**  
Belarusian national technical university  
Minsk, Belarus

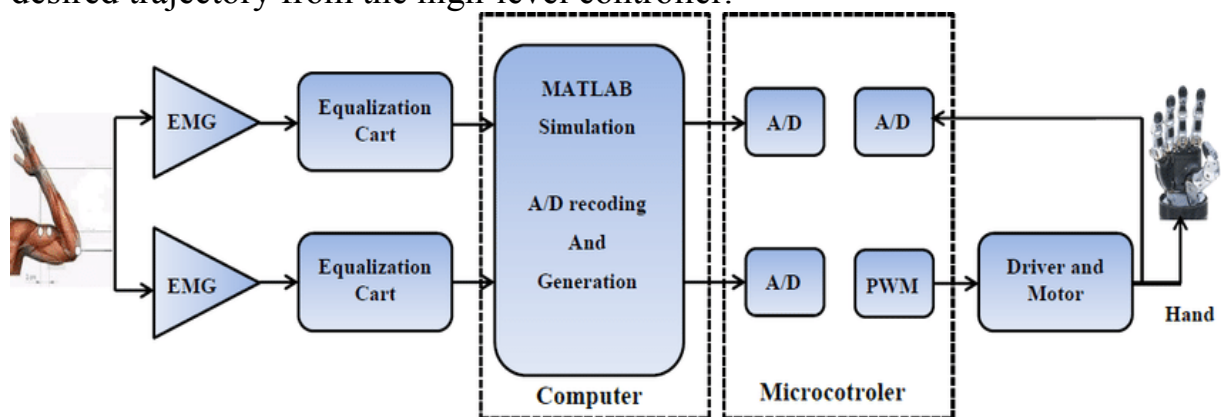
The operation of modern my electric hand prosthesis is governed by a mathematical pipeline that translates biological signals into controlled mechanical force. This work formalizes the key transformations from electromyography (EMG) signal acquisition to adaptive grip force control, presenting the governing equations and their practical significance. The raw my electric signal  $m(t)$  is a stochastic, zero-mean time series recorded via surface electrodes. To extract usable information, it first undergoes band pass filtering (typically 20–500 Hz) to remove motion artifact and DC offset, followed by full-wave rectification and smoothing via a low-pass filter to produce the signal envelope.



Picture 1. Structural diagram prosthetic hand.

The dominant technology in commercial and research prostheses are the DC brushless motor. These motors are preferred for their high torque-to-weight ratio, reliability, and efficient power use. A single prosthetic hand typically contains multiple independent motors often five or six dedicated to specific movements: one for the thumb's opposition, one for the index finger, one for the middle finger, and a shared motor for the ring and little fingers, with an additional motor for thumb rotation or wrist movement. This under-actuated design (using fewer motors than degrees of freedom) is a clever compromise, reducing weight and complexity while still enabling a wide range of pre-programmed grip patterns, such as key pinch, palmer grasp, and tool hold. The motors are exceptionally small, often no larger than a pencil eraser, yet they can generate a fingertip pinch force of 30 to 150 Newton's enough to firmly hold a bag of groceries or delicately grasp a grape. For a more biometric approach, research is advancing alternative actuator technologies. Shape Memory Alloy

(SMA) wires act like artificial muscle fibers: when an electrical current heats the alloy, it contracts, pulling a tendon to flex a finger. While quieter and more direct in its imitation of muscle contraction, SMA technology struggles with slower response times and higher energy consumption due to the heating and cooling cycles. Another promising area is pneumatic or hydraulic artificial muscles (PAMs, which are soft, inflatable actuators that contract when pressurized. These offer excellent compliance and a natural "softness" in interaction, making them ideal for applications where safety and adaptability are paramount, such as in prosthetics designed for children or for tasks involving fragile objects. Integrated sensors, such as encoders and torque sensors, constantly measure the motor's actual position, velocity, and output force. This data is fed back to the prosthesis's microcontroller, which compares it to the desired trajectory from the high-level controller.



Picture 2. System of control prosthetic hand

Mathematical models for hand prostheses involve kinematic, dynamic, and control equations, primarily utilizing Denavit-Hartenberg (D-H) parameters for motion, Euler-Lagrange for dynamics, and linear static analysis for finger force calculation. Key equations determine finger phalanx lengths, joint transformation matrices, and motor torque. Kinematic Modeling (D-H Method): Used to determine the position of the fingertip based on joint angles. The Homogenous Transformation Matrix Finger Link Length Motor Torque Equation Unlike current prosthetics that are either purely cosmetic or offer basic motor control, our solution aims to restore the sensation of touch and proprioception. The breakthrough is two-fold Tactile Sensor Skin will implement a flexible sensor array that not only detects pressure but also distinguishes between textures and temperatures. On-Device Learning Instead of relying on cloud computing (which has latency), we will use a microcontroller capable of "on-device" incremental learning. This allows the prosthesis to adapt to the user's unique micro-movements and predict grip types in real-time without external processing, making the control feel intuitive and instantaneous.

DC coreless motors are used in bionic hands because they are lightweight, durable, small, and have a high output/volume ratio. In addition, they are very

energy efficient, allowing the prosthetic to be used for several days between charges.

Table 1. List of components of a prosthetic hand

<b>Component</b>	<b>Example</b>	<b>Function</b>
Input (brain)	SEMG Electrodes, IMES	Captures intention
Processor	Microcontroller (ARM, Arduino)	Interprets signal & commands motors
Actuator(motor)	DC Servo, Linear Actuator	Moves fingers (flexion/extension)
Transmission	Tendons (Dyneema), Gears	Transfers power to joints
Sensor(feedback)	FSR, IMES, Encoders	Detects pressure, slip, position
Output(sensory)	Vibrotactile Motor	Provides feeling

While modernized hand prosthetics elsewhere integrate whisper-quiet motors and intuitive my electric sensors for a natural, easy grip, Belarusian patients face a starkly different reality where such technology remains effectively absent. The national healthcare discourse, focused on joint replacements and spinal systems, makes no mention of advanced upper-limb bionics instead, the prosthetic sector is explicitly restrained by a "limited availability of skilled prosthetics" and the total "lack of reimbursement policies" leaving cutting-edge devices financially and logistically out of reach .While neighboring countries advance, Belarus exports expertise in rehabilitation centre layouts ,yet within its borders, amputees are left waiting not for an upgrade, but for the very infrastructure that would make a modern, functional hand anything other than a foreign luxury.

#### References

1. Yang H., Tao Z., Yang J., Ma W., Zhang H., Xu M., Wu M., Sun S., Jin H., Li W., Wang L., Zhang S. (2025). A lightweight prosthetic hand with 19-DOF dexterity and human-level functions. *Nature Communications*,16(1), 955. [<https://doi.org/10.1038/s41467-024-54837-9>](<https://doi.org/10.1038/s41467-024-54837-9>).
2. Kalita A. J., Kalita Z., Kakoty N. M., (2025). Clinical evaluation of prosthetic hand: A systematic review on existing methods, limitations and future directions. *Medical Engineering & Physics*, 146, 104432. [<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104432>] (<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104432>).

## **ВЫБОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ**

**Александровский С.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) обладают самой высокой энергоэффективностью по сравнению с другими типами электрических машин. Достигается это благодаря использованию постоянных магнитов с высокой коэрцитивной силой на основе сплавов редкоземельных металлов, например NdFeB с максимальной магнитной энергией до  $400 \text{ кДж/м}^3$ . Применение редкоземельных металлов приводит к увеличению стоимости СДПМ. Отсутствие дополнительных обмоток на роторе не позволяет осуществить пуск и стабилизацию скорости СДПМ при изменении нагрузки без силового преобразователя с системой автоматического управления. Коммутация тока в силовых обмотках СДПМ осуществляется с помощью транзисторов инвертора, получающих управление согласно информации о положении ротора. Эту информацию получают с помощью датчиков положения ротора (ДПР) (энкодер или резольвер) с непрерывным контролем положения ротора с постоянными магнитами. Сигналы от ДПР поступают в систему управления преобразователем частоты, от которого питается трехфазная обмотка статора. Преобразователь частоты управляется так, что по всем трем фазам обмотки статора протекают синусоидальные токи. Это приводит к тому, что вектор МДС обмотки статора и вектор магнитного потока ротора находятся в ортогональном положении и вращаются синхронно, т.е. взаимно они не подвижны. Результатом такого управления является постоянный электромагнитный момент независимо от положения ротора.

Можно отметить, что уже существуют алгоритмы, позволяющие коммутировать токи в обмотках СДПМ без использования ДПР. Такие системы требуют больших вычислительных ресурсов, т.к. данные алгоритмы основаны на математической модели СДПМ. Поскольку параметры двигателя в зависимости от ряда условий (например, температурные изменения сопротивления обмоток статора СДПМ) могут изменяться в определенном диапазоне, то качество управления СДПМ будет ниже, чем при использовании ДПР. Отсутствие ДПР также не позволяет регулировать момент двигателя при нулевой скорости, что необходимо, например, для грузоподъемных механизмов (лифты).

Возможность управления моментом двигателя позволяет качественно в широком диапазоне регулировать скорость. Поэтому СДПМ широко используются в следящих и позиционных электроприводах (ЭП) металлорежущих станков и других точных механизмов.

В общепромышленных механизмах, где требуются высокая надежность, невысокая цена и более простая система управления, СДПМ, как правило, не применяются. В таких механизмах применяются асинхронные двигатели (АД), питание которых может осуществляться от преобразователя частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения.

Асинхронные двигатели в отличие от СДПМ имеют в роторе короткозамкнутую (типа беличья клетка) или фазную обмотку, что приводит к более высоким потерям в АД (потери на намагничивание, потери от тока ротора). Вместе с тем обмотка ротора в АД выполняет две функции: 1) обеспечивает прямой пуск АД при подключении к сети; 2) демпфирование колебаний скорости АД при изменении нагрузки на валу двигателя.

Поскольку ПЧ по сравнению с АД обладает меньшей надежностью, то при сбое или неисправности ПЧ предусматривается возможность подключения или запуска АД напрямую от сети. Такое подключение получило название байпас (от англ. *Bypass* – обход, объезд) и находит широкое применение в ЭП насосов, вентиляторов и других механизмов.

Потребность в электродвигателе с энергоэффективностью как у СДПМ и возможностью прямого пуска от сети как у АД привела к созданию двигателей ротор, которых имеет и короткозамкнутую обмотку, и постоянные магниты. В литературе такие двигатели получили названия: асинхронный двигатель с нулевым скольжением, гибридный асинхронный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами с прямым пуском.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателей

№	Условный габарит	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	КПД, %	Масса, кг
Гибридный асинхронный двигатель с постоянными магнитами серии WQuattro					
1	80	0,75	1500	84,2	15,1
2	100L	2,2	1500	90,2	33,2
3	132M/L	7,5	1500	93,0	87,6
Асинхронный двигатель серии АИР					
4	71A4	0,75	1350	72,1	9,4
5	90L4	2,2	1420	79,7	18,1
6	132S4	7,5	1440	86,0	53,5

Сравнительный анализ электродвигателей (таблица 1) показывает, что гибридный двигатель с постоянными магнитами имеет более высокий КПД, но в тоже время такие двигатели имеют большие габариты и массу. Стоимость таких двигателей может превысить стоимость СДПМ, т.к. используются дорогие материалы и сложная конструкция ротора. В связи с этим выбор энергоэффективной системы ЭП требует дополнительных расчетов эксплуатационных затрат для каждого конкретного механизма.

УДК 681.5

## **ОБУЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ ТУРКМЕНИСТАНА**

**Аллабаева К.Б.**

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт  
Ашхабад, Туркменистан

Развитие промышленности, энергетики и транспортной инфраструктуры Туркменистана требует подготовки квалифицированных инженеров в области автоматизации и систем управления. В условиях перехода к цифровой экономике возрастает роль автоматизированных систем проектирования (САПР) и интеллектуальных систем управления технологическими процессами. Ведущую роль в подготовке кадров играют технические вузы страны, в частности Туркменский государственный архитектурно-строительный институт и Международный университет нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева.

Подготовка инженеров по направлению «Автоматизация и управление» основывается на сочетании фундаментальных дисциплин (высшая математика, физика, теория автоматического управления) и специализированных курсов, включающих:

- теорию автоматического управления;
- микропроцессорную технику;
- программируемые логические контроллеры (ПЛК);
- автоматизированные системы проектирования;
- моделирование динамических систем.

Учебные программы ориентированы на формирование профессиональных компетенций в области анализа, синтеза и оптимизации систем управления. Важным компонентом является применение программных средств моделирования и проектирования, что соответствует современным тенденциям инженерного образования [1].

Практико-ориентированное обучение. Современная инженерная подготовка в Туркменистане характеризуется усилением практической составляющей. Лабораторные занятия проводятся с использованием учебных стендов, цифровых датчиков и промышленных контроллеров. Производственная практика организуется на предприятиях нефтегазового комплекса, энергетики и строительства.

Особое значение имеет внедрение элементов дуального обучения, обеспечивающего тесную связь теоретической подготовки с реальными производственными задачами. Это способствует развитию навыков проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Цифровизация и инновационные технологии. В условиях глобальной цифровизации возрастает значение технологий компьютерного моделирования, промышленного интернета вещей (IIoT) и интеллектуальных систем управления. Учебные планы технических вузов постепенно адаптируются к международным образовательным стандартам, что отражается во внедрении курсов по цифровому проектированию и основам киберфизических систем [2].

Перспективным направлением является развитие научно-исследовательской деятельности студентов, участие в проектных работах и стартапах, связанных с автоматизацией производственных процессов.

Таким образом, система подготовки специалистов по автоматизации систем управления и проектирования в технических вузах Туркменистана развивается в соответствии с современными требованиями промышленности и цифровой экономики. Интеграция теоретических знаний, практической подготовки и инновационных технологий формирует основу для подготовки конкурентоспособных инженерных кадров. Дальнейшее совершенствование образовательных программ связано с расширением международного сотрудничества, модернизацией лабораторной базы и внедрением цифровых образовательных платформ.

1. Петров А. В. Теория автоматического управления. — М.: Высшая школа, 2018.
2. Иванов И. И. Цифровые технологии в инженерном образовании. — СПб.: Политехника, 2020.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ САПР ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОД АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВОМ

**Барышев А.А., Татур Е.Ю.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск

Современные аддитивные технологии (АП) кардинально меняют подходы к проектированию. Сегодня инженеру уже недостаточно просто создать трёхмерную модель — требуется умение работать со сложнокриволинейными поверхностями, решетчатыми структурами и проводить топологическую оптимизацию. Роль САПР выходит далеко за рамки простого черчения, становясь ключевым звеном в реализации «сдвига парадигмы производства» (manufacturing paradigm shift) [1]. В связи с этим перед разработчиками возникает потребность в выборе оптимального программного обеспечения. Целью данной работы является сравнительный анализ трёх распространенных систем автоматизированного проектирования (САПР) — КОМПАС-3D, SOLIDWORKS и Autodesk Fusion 360 — на предмет их пригодности для подготовки моделей к аддитивному производству.

Анализ проводился по ключевым для АП критериям [2]:

1. Параметрическое ядро: возможность управления геометрией через историю построений и переменные.
2. Инструменты генеративного дизайна и топологической оптимизации: наличие встроенных модулей для расчета оптимальной формы с минимизацией материала.
3. Работа с решетчатыми структурами: возможность создания легких внутренних структур.
4. Интеграция и экспорт: поддержка форматов для 3D-печати (STL, 3MF).

КОМПАС-3D (разработка АСКОН) - отечественная САПР с классическим параметрическим ядром С3D. Система отлично подходит для машиностроительного проектирования, обеспечивая полный цикл создания документации. Однако для задач АП наблюдается ограниченность: инструменты топологической оптимизации не являются встроенными (требуют сторонних решений), а создание сложных решетчатых структур затруднено. Основное преимущество — строгое параметрическое управление и соответствие ГОСТ при подготовке конструкторской документации.

SOLIDWORKS (Dassault Systèmes) - мощный инструмент параметрического моделирования, чьи возможности для подготовки моделей к 3D-печати подробно раскрыты в специализированной литературе. Система отличается глубокой интеграцией расчетных модулей. Ключевой особенностью является наличие встроенного модуля Topology Optimization, который позволяет на основе нагрузок и материалов

автоматически генерировать оптимальную геометрию детали, пригодную именно для аддитивного производства [3].

Autodesk Fusion 360 - облачная платформа, объединяющая параметрическое и прямое моделирование. В отличие от конкурентов, Fusion 360 предлагает наиболее широкий спектр инструментов именно для АП: встроенный модуль Generative Design (генеративный дизайн), возможности работы с T-Spline для органических форм и полная поддержка решетчатых структур. Благодаря этому Fusion 360 становится, самым гибким инструментом на этапе концептуального дизайна под 3D-печать.

Проведенный анализ позволяет сделать несколько практических выводов. КОМПАС-3D является оптимальным выбором для предприятий, где приоритетом является строгая параметризация и соответствие стандартам, а сложные топологические расчеты выносятся в отдельный софт. SOLIDWORKS занимает золотую середину, предлагая мощное параметрическое ядро и встроенные инструменты прочностного анализа, которых достаточно для большинства задач АП [1]. Когда речь идёт о гибкости проектирования под АП, Fusion 360 вырывается вперёд за счет генеративного дизайна и облачных вычислений, однако в развитии классической параметрической базы он всё же уступает SOLIDWORKS.

Итоговый выбор САПР для аддитивного производства напрямую зависит от поставленных задач. Для сложных нерегулярных структур с максимальным снижением веса предпочтителен Autodesk Fusion 360. Для классических машиностроительных задач с эпизодической 3D-печатью оптимален SOLIDWORKS. КОМПАС-3D со своей библиотекой стандартных параметрических изделий будет надёжным решением в рамках импортозамещения.

1. Onwubolu G.C. Introduction to SolidWorks: A Comprehensive Guide with Applications in 3D Printing. – 1st ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 1193 p.

2. Geyer S., Hölzl C. Comparison of CAD Software for Designing Cellular Structures for Additive Manufacturing // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 8. – P. 3306. (DOI: 10.3390/app14083306). – URL: <https://librarysearch.aut.ac.nz/vufind/EdsRecord/edb,176881117> / (дата обращения: 14.02.2026).

3. Lakshmipathy R. Integrating Next Generation Technology: Topology Optimization // MySolidWorks Official Blog. – 2019. – URL: <https://my.solidworks.com/reader/wpressblogs/2019%252F10%252Fintegrating-next-generation-technology-topology-optimization.html?&lang=ru> / (дата обращения: 14.02.2026).

## **АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ**

**Барышев А.А., Татур Е.Ю.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск

Сегодня, когда санкционное давление растет, а вопрос технологического суверенитета стоит особенно остро, промышленности нужны инструменты, которые позволят быстро и гибко заменять выпадающие импортные комплектующие. Целью данной работы является анализ потенциала аддитивных технологий (АТ) как ключевого элемента цифрового производства в решении задач импортозамещения в машино- и приборостроении на примере опыта Российской Федерации и Республики Беларусь.

Аддитивные технологии, или технологии послойного синтеза, являются одним из базовых элементов современного цифрового производства. Они позволяют превратить цифровую 3D-модель в готовое изделие, минуя длительный этап технологической подготовки и изготовления оснастки. Как показывают исследования Федюнина А.А. и Симачева Ю.В. [1], в условиях санкций умение быстро создавать прототипы и выпускать небольшие партии изделий становится критически важным для технологической независимости. И именно АТ дают такую возможность, сокращая время выхода продукта с месяцев до считанных дней.

Наиболее ярко преимущества АТ проявляются в автомобилестроении и сфере обслуживания техники. Например, на ПАО «КАМАЗ» с помощью 3D-принтеров наладили оперативное производство пластиковых деталей (заглушек, фиксаторов, корпусов) для ремонта оборудования, что позволило сократить простои из-за ожидания импортных запчастей. Особую ценность представляет возможность выпуска деталей для снятых с производства моделей [2]. На волне массового ухода иностранных брендов 3D-печать становится настоящим спасением для вторичного рынка автозапчастей, позволяя напечатать единичный или мелкосерийный компонент гораздо дешевле, чем используя дорогостоящее литье. В Республике Беларусь этот опыт успешно перенимают на Минском автомобильном заводе: в 2025 году здесь внедрили промышленный 3D-принтер для создания полимерных деталей сложной геометрии. Технология позволяет изготавливать элементы интерьера и экстерьера для новых моделей (МАЗ-Х, МАЗ-350) всего за несколько дней вместо 1-2 месяцев при классическом подходе [3].

В тяжелом машиностроении и энергетике ключевые успехи демонстрирует российский «Росатом». Специалистами компании с помощью реверс-инжиниринга и последующей 3D-печати из

коррозионностойкого сплава Hastelloy G35 были полностью импортозамещены сложные комплектующие для насосного оборудования (импеллеры, рабочие колеса), эксплуатирующиеся в агрессивных средах. Данный подход позволил не только сократить сроки ремонта, но и запустить проект по созданию «вечного колеса» с увеличенным ресурсом работы за счет применения новых полимерных материалов.

Параллельно с этим в России активно развивается и собственная научно-производственная база аддитивного оборудования. Так, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» выиграл субсидию Минобрнауки на разработку отечественной установки для селективного лазерного сплавления медных сплавов — технологии, критически важной для производства компонентов электроники и СВЧ-устройств.

Для Республики Беларусь ключевым событием стало открытие в Минске в 2025 году совместного Центра аддитивных технологий госкорпорации «Росатом» и Института БелНИИТ «Транстехника». Данный центр полностью укомплектован оборудованием, не зависящим от импорта из «третьих» стран, и призван обеспечить потребности белорусской промышленности в высокотехнологичных комплектующих для ракетостроения, машиностроения и медицины. Создание Центра стало живым примером практической реализации стратегии импортозамещения на уровне Союзного государства.

Таким образом, аддитивные технологии сегодня — это не просто способ копировать недостающие запчасти, а полноценный инструмент цифровой трансформации промышленности. Они обеспечивают гибкость производства, сокращают логистические цепочки и, что, пожалуй, самое главное, стимулируют развитие собственной научно-производственной базы. А значит, помогают закладывать фундамент для настоящего технологического суверенитета.

1. Федюнина А. А., Симачев Ю. В. Технологический суверенитет в развитии цифровой экономики России: импорт цифровых товаров в период санкций. — Журнал Новой экономической ассоциации, 2025, New Economic Association, том 67(2), страницы 244-254.

2. 3D-технологии в промышленности России и Алтая // Союз промышленников Алтайского края. — 2025. — URL: <https://spa22.ru/3d-tehnologii-v-promyshlennosti-rossii-i-altaya/> (дата обращения: 14.02.2026).

3. МАЗ пашырае прымяненне адытыўных тэхналогій: новы 3D-прынтар паступіць на вытворчасць ужо ў гэтым годзе // БелТА. — 2026. — URL: <https://blr.belta.by/economics/view/maz-pashyrae-prymjanenne-adytyunyh-tehnalogij-novy-3d-pryntar-pastupits-na-vytvorchasts-uzho-u-getym-154586-2026/> (дата обращения: 14.02.2026).

## **ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПСИХОСОЦИАЛЬНОГО АНКЕТИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ БНТУ**

**Белова С.В., Киянко М.В., Толкач И.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Проблема психического здоровья студентов остаётся одной из актуальных во всём мире и в Республике Беларусь. В вузовской среде отмечаются высокие уровни распространённости суицидальных переживаний и попыток. По данным исследований, обучающиеся сталкиваются с академическими стрессами, личностными кризисами и депрессиями. Для своевременного выявления факторов риска суицидального поведения и оценки психоэмоционального состояния студентов необходимы инструменты систематического анкетирования и анализа.

Разрабатываемое приложение призвано автоматизировать психосоциальное анкетирование студентов БНТУ, обеспечивая сбор, хранение и анализ психологических тестов. Это позволит выявлять предрасположенность обучающихся к психологическим проблемам и формировать аналитические отчёты для психологов и методистов.

В системе используются специальные методики психологического тестирования: в частности, тест по шкале Бека (для студентов 3–5 курсов) и тесты по шкале Горской (для лиц до 18 лет и для 1–2 курсов). При прохождении каждого теста программа последовательно выводит вопросы и варианты ответов в соответствии с методикой (с одиночным или множественным выбором, шкальными оценками и др.), а после окончания автоматически подсчитывает баллы по заданным ключам.

После завершения теста система сохраняет результаты каждого прохождения в базе данных, что обеспечивает возможность последующего анализа динамики психоэмоционального состояния студента при повторных тестированиях.

Система проектируется как современное веб-приложение с клиент-серверной архитектурой. Для единообразия и воспроизводимости среды разработки используется контейнеризация Docker. Фронтенд разрабатывается с применением JavaScript (и TypeScript) на базе библиотеки React, с использованием HTML и CSS для разметки и оформления интерфейса. Для тестирования и отладки API-интерфейсов применяется Postman, а для управления версиями кода — система контроля версий Git. Серверная часть реализуется на платформе Java (версия 25) с использованием фреймворка Spring 4.0.2. В качестве СУБД выбран PostgreSQL. Таким образом, объединение технологий Docker, JavaScript/React, Spring и PostgreSQL обеспечивает высокую переносимость решения и возможность расширения системы в будущем.

## **СЕТЕВАЯ АДАПТИВНАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА CATS**

**Белова С.В., Кондратенок Е.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

CATS – автоматизированная система управления учебным процессом, разработанная на кафедре «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ студентами и магистрантами в ходе курсового и дипломного проектирования, а также работы над магистерскими диссертациями.

Система направлена на улучшение качества учебного процесса в университете посредством внедрения методов искусственного интеллекта для адаптивности обучения, автоматизации составления электронных учебно-методических комплексов, процессов курсового и дипломного проектирования и иных функциональных возможностей.

Программное обеспечение доступно в Интернет и в локальной сети факультета информационных технологий и робототехники по адресу [educats.bntu.by](http://educats.bntu.by). Кроме того, разработаны мобильные версии системы, которые бесплатно можно скачать в AppStore и GooglePlay.

«Адаптивная обучающая система CATS» - призёр конкурса «Лидер цифрового образования 2024».

CATS (англ., Care About The Student) в переводе с английского - «Забота о студентах». Система удобна в использовании и включает полный набор функционала для реализации учебного процесса. Она используется в процессе преподавания дисциплин «Основы программной инженерии», «Компьютерные системы и сети», «Основы информационной безопасности», «Тестирование программного обеспечения» и многих других.

CATS представляет собой крупный проект автоматизированной системы управления обучением, позволяющий публиковать различные учебные материалы, проводить контроль текущей успеваемости и оценку знаний студентов с помощью тестов, осуществлять руководство курсовым и дипломным проектированием, а также реализовать дистанционное обучение.

Система CATS реализована в виде веб-приложения и мобильных клиентов. В этом году осуществляется переход на 3-ю версию приложения, которая в отличие от предыдущих версий использует методы искусственного интеллекта для реализации алгоритмов адаптивности системы к знаниям студента. Это означает, что система сама может проверять знания студента и предлагать нужный учебный материал для повторения. Также в новую версию включены видеочат и видеострим, чтобы можно было проводить лекции из аудитории и транслировать занятия дистанционно.

## **КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАГРЕВА ТВЧ**

**Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Курилёнок А.А.**

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Специализированные участки для изготовления деталей с покрытиями, содержат генератор ТВЧ, универсальную центробежную установку со шкафом управления, подключенные к электрическим и водным коммуникациям, к вытяжной вентиляции и к системе подачи сжатого воздуха. Рабочее место оборудуется столом-верстаком, необходимым для размещения на нем приспособлений и выполнения вспомогательных операций, шкафом-стеллажом для хранения заготовок и сменной технологической оснастки. Место для складирования готовых изделий в целях предотвращения пожаров оснащается ящиком с песком. На участке необходим также токарный станок для зачистки комплектов поджимных центров (или крышек) в конце каждой смены.

### ***Конструкционные особенности центробежных установок.***

Вертикальное расположение оси вращения установок наиболее предпочтительно для автоматизации технологических операций по нанесению покрытий, в том числе и по осуществлению наиболее трудоемкой операции по засыпке порошка в полость заготовки. Поэтому вертикальная схема исполнения центробежной установки используется, главным образом, в создании специального оборудования с различной степенью автоматизации для нанесения покрытий на однотипные детали, длина которых меньше их диаметра.

Горизонтальное расположение оси вращения наилучшим образом подходит для создания универсальных установок для нанесения покрытий, легко переналаживаемых на любые типоразмеры деталей. В автоматизированном исполнении, настроенные на выпуск определенного типоразмера детали, установки с горизонтальным расположением оси вращения могут выполнять функции специальных установок. К специальным установкам относятся также все виды установок, предназначенных для конкретных исследований [1–2].

Во избежание деформации детали и заклинивания подшипников качения опор, а также для компенсации температурного расширения детали во всех типах центробежных установок необходимо использовать упругий поджим. При этом усилие зажима должно, с одной стороны обеспечивать надежное крепление детали, с другой стороны, не должно приводить к высокотемпературной деформации с образованием бочкообразной формы у детали.

На основе практического опыта установлено, что диапазон скорости вращения детали для всех типов установок не превышает 3500 об/мин. Это обстоятельство значительно упрощает выбор двигателей и подшипников.

В качестве опор шпинделей центробежных установок в зависимости от направления воспринимаемой нагрузки целесообразно использовать стандартные радиальные, радиально-упорные и упорные подшипники качения с подводом смазки через масленки, выполненные в крышках опор. Для промышленных установок в корпусах опор необходимо выполнять полости для создания контура принудительного водяного или воздушного охлаждения. Следует отметить, что контур охлаждения установки может быть подключен к системе охлаждения установки ТВЧ, например, к водоохлаждаемому индуктору. Охлаждение детали после нанесения покрытия может по необходимости осуществляться водяным спреем или сжатым воздухом [3].

Для выхода газов, образующихся во внутренней полости детали при нанесении покрытия, необходимо предусматривать вентиляционные отверстия в прокладках, крышках и в центрах установки. Следует отметить, что указанные отверстия могут также использоваться для создания защитной атмосферы, измерения температуры внутри детали, подачи сжатого воздуха или воздушно-капельной смеси позволяющие ускорить остывание внутренней поверхности.

Автоматизация основных операций для специального промышленного оборудования является обязательной. Автоматизация снижает влияние «человеческого фактора», повышает повторяемость результатов, потому для всех типов установок необходимо предусмотреть места установки средств измерения, защиты и блокировки, сбора данных, контроля – датчики скорости, температуры, оперативного отключения и т.д.

С целью обеспечения требуемого уровня безопасности труда все движущиеся механизмы закрывают защитными кожухами, а зону нагрева – жаропрочным и ударопрочным экраном. Кроме того, для всех установок необходимо обеспечить заземление и блокировку включения индукционного нагрева при отсутствии вращения детали.

1. Организация производства биметаллических деталей / Л.П. Кашицин, А.Л. Худолей, И.А. Сосновский, С.Е. Клименко // Мир техники и технологий. – 2002. – № 4. – С. 48–49.

2. Кашицин, Л.П. Центробежное оборудование для нанесения порошковых покрытий / Л.П. Кашицин, А.Л. Худолей // Мир техники и технологий. – 2002. – № 1. – С. 17–21.

3. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей. – Минск: // Вестник фонда фундаментальных исследований, 2013. – № 3 (36) – С. 70–87.

## **СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО РАСКРОЯ ПОЛОТНА ТИПА «ЛЕТАЮЩАЯ ПИЛА»**

**Благодаров К.Е.<sup>1</sup>, Марченко И.С.<sup>1</sup>, Гагаков Ю.В.<sup>2</sup>,  
Карпеленя А.Ю.<sup>3</sup>, Козел А.Д.<sup>3</sup>**

- 1). Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.
- 2). ООО «Алютех Инкорпорейтед»  
Минск, Республика Беларусь.
- 3). УО «Национальный детский технопарк»  
г. Минск Республика Беларусь.

Одним из подходов к увеличению производительности технологических процессов является переход от дискретного к непрерывному типу.[1]

Так, в некоторых отраслях промышленности готовое изделие создается не из отдельных заготовок, а из бухт листового металла, рулонов бумаги и т.д. Чтобы обеспечить непрерывность процесса, при этом на выходе получая отдельные единицы готовой продукции, необходимо перевести процесс раскроя из дискретного который требует остановки технологического процесса для реза, к непрерывному, осуществляя рез «на лету».

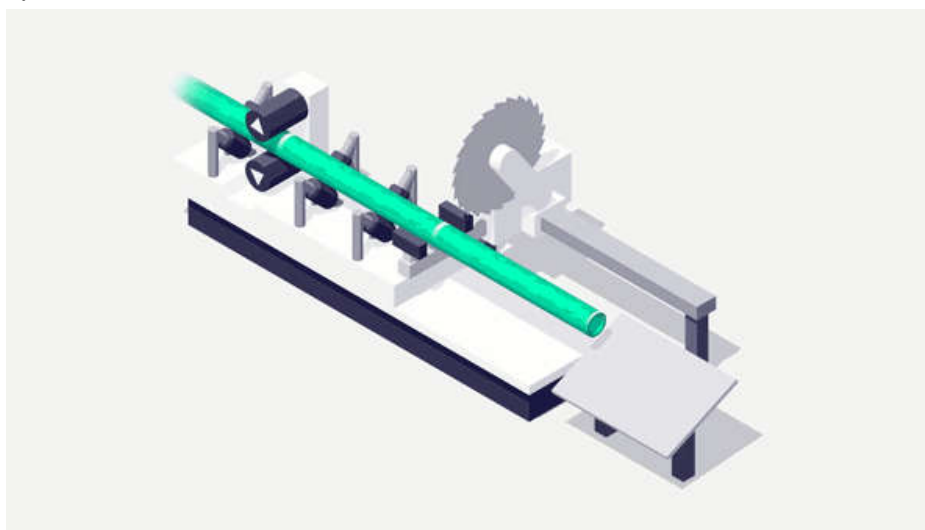


Рисунок 1 – Общий вид системы непрерывного раскроя полотна

Поскольку непрерывная подача материала не должна повлиять на его обработку, в рассматриваемом случае – реза, режущее устройство должно перемещаться синхронно с полотном. Поэтому положение и скорость режущего устройства должны быть синхронизированы со скоростью подачи полотна. Как правило, режущее устройство устанавливают продольно оси подачи полотна на каретке, приводимой в движение сервоприводом через шарико-винтовую, зубчато-реечную или ременную передачу. После успешного вхождения в синхронизированное движение:

когда каретка достигла точки реза и следует вместе с ней на одинаковой скорости; начинается обработка. После завершения обработки, режущее устройство останавливается и возвращается в исходное положение.[2]

Система управления состоит из сервопривода, который управляет положением каретки с режущим инструментом, привода подачи полотна и энкодера, который обеспечивает подсчёт длины профиля и реальной скорости подачи полотна. Задающее воздействие для сервопривода состоит из постоянной части, которая учитывает смещение и длину требуемой конечной продукции, и переменной части, включающей в себя перемещение точки реза, то есть изменение значения со скоростью, равной скорости подачи полотна, полученной с энкодера.

Таким образом ключевым параметром системы является не только фактическое вхождение в синхронное движение, но также и время регулирования переходного процесса, поскольку длина перемещения каретки режущего инструмента ограничена конструктивно. Длина рабочего хода каретки определяется скоростью подачи материала, временем регулирования переходного процесса синхронизации со скоростью подачи, которое в свою очередь зависит от инертности каретки с режущим инструментом, а также временем реза, определяемым технологическими параметрами режущего инструмента и его типа, дисковой или ленточной пилы. В случае, когда ширина полотна в разы превышает размер режущего инструмента, инструмент располагают под углом к полотну, а не перпендикулярно.

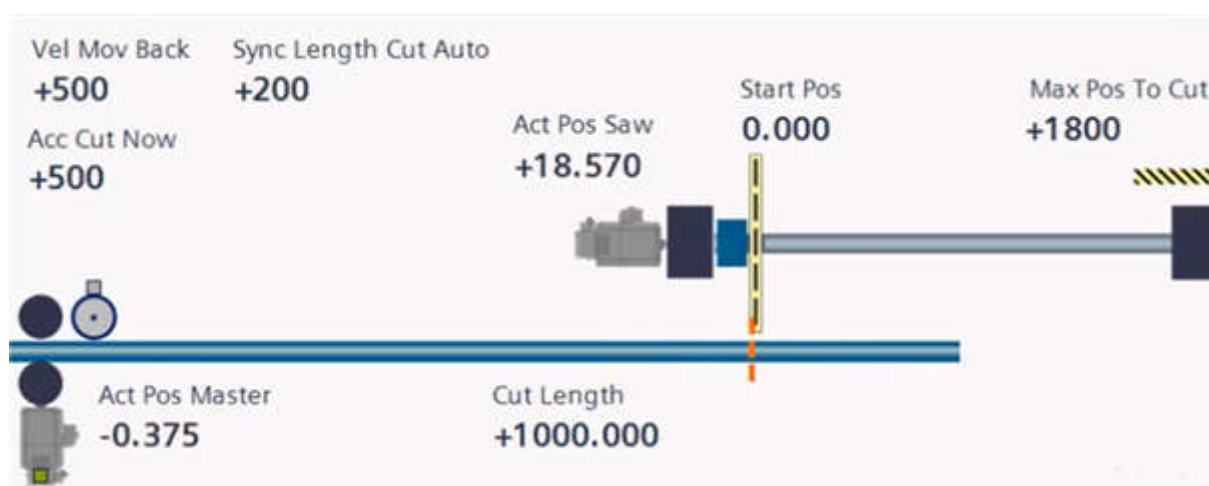


Рисунок 2 – Визуализация процесса с ключевыми параметрами

1. Гируцкий, И. И Технические средства автоматизации: учебное пособие / И. И. Гируцкий. – Минск : РИВШ, 2024. – 298 с.

2. SIMATIC S7-1500T Flying Saw [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109962920/simatic-s7-1500t-flying-saw-flyingsawbasic-?dti=0&lc=en-WW> Дата доступа 28.01.2026.

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ****Васильев С. В.**Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Пространственная векторная ШИМ начала внедряться в преобразователях частоты (ПЧ) с 1992 года. Стратегия пространственной векторной ШИМ основана на векторном представлении напряжения переменного тока и ориентирована на микропроцессорную реализацию.

Пространственная векторная широтно-импульсная модуляция напряжения применяется практически во всех современных ПЧ и существенно отличается от известных систем широтно-импульсной модуляции напряжения.

В системах векторного управления АД обычно ПЧ состоит из выпрямителя с выходным напряжением постоянного тока  $U_d$  и автономного инвертора напряжения (АИН), формирующего трехфазное напряжение для обмоток статора АД. Трехфазный двухуровневый АИН дает 8 возможных состояний ключей, создающих 6 активных ненулевых векторов  $\bar{U}_1 - \bar{U}_6$  и 2 нулевых вектора  $\bar{U}_7, \bar{U}_8$ . При переключении транзисторов АИН через каждые  $60^\circ$  периода выходного напряжения максимальная величина линейного (междуфазного) напряжения будет равна  $U_d$ , а максимальная величина фазного напряжения  $\frac{2}{3}U_d$ .

В течение  $60^\circ$  периода выходного напряжения положение вектора линейного напряжения будет неизменным. Через каждые  $60^\circ$  вектор линейного напряжения  $\bar{U}$  скачком изменяет положение при прежнем значении величины, равной  $U_d$ .

Желаемый вектор напряжения  $\bar{U}_m^*$ , который отличается по величине от шести ненулевых векторов, можно синтезировать с помощью комбинации 8-и состояний ключей АИН[1].

Можно повысить эффективность алгоритма пространственно-векторной модуляции за счет включения основных векторов на модуляционном периоде с симметричным расположением нулевых векторов. Такой алгоритм можно назвать – «симметричный», когда нулевые вектора симметрично размещены в начале, середине и конце модуляционного периода, а при формировании коммутационных функций используется треугольная развертка. Для реализации пространственно-векторной модуляции можно использовать и пилообразную развертку.

Модифицировать алгоритм пространственно-векторной модуляции с целью минимизации переключений транзисторов инвертора и снижения частоты коммутации можно за счет изменения последовательности

активации основных векторов. Например, можно использовать следующие последовательности переключений, состоящих из пяти векторов:  $U_0 - U_1 - U_2 - U_1 - U_0$  или  $U_2 - U_1 - U_7 - U_1 - U_2$  [2].

Если сигнал нулевой последовательности симметричной пространственно-векторной модуляции имеет гладкую форму, то при пространственно-векторной модуляции с измененным алгоритмом активации основных векторов, сигнал нулевой последовательности имеет точки разрыва. Поэтому, такой алгоритм можно назвать «разрывной» пространственно-векторной модуляцией.

Число переключений транзисторов АИН при использовании разрывной пространственно-векторной модуляции, и, как следствие, частота коммутации, снижается, за счет большей доли действия нулевых векторов на модуляционном периоде. Так, при симметричной пространственно-векторной модуляции с треугольным несущим сигналом на одном модуляционном интервале происходит шесть коммутаций автономного инвертора, а при использовании разрывной пространственно-векторной модуляции – только три. Таким образом, частота коммутаций автономного инвертора снижается на 33 %. На практике это означает, что при использовании такого алгоритма управления транзисторами автономного инвертора будут снижаться коммутационные потери, и можно снизить габариты технических средств, обеспечивающих отвод тепла от транзисторов. С другой стороны, появляется возможность увеличить частоту коммутации на 33 % для обеспечения более высокой электромагнитной совместимости автономного инвертора, например, с приводным электродвигателем, если первый используется в электроприводе переменного тока. В [2] приведены зависимости коэффициента искажения тока и напряжения на выходе автономного инвертора с разрывной пространственно-векторной модуляцией.

Из приведенных зависимостей видно, что при увеличении относительной длительности коммутации, коэффициенты искажений токов и напряжений снижаются, что свидетельствует о том, что форма кривой тока становится близкой к синусоидальной. При этом, алгоритм зубчатой пространственно-векторной модуляции обеспечивает меньшие искажения синусоидальности тока и напряжения, чем пиковая пространственно-векторная модуляция. Так в первом случае суммарный коэффициент гармонических искажения равен 3,12 %, а во втором случае – 7,45 %, при величине модуляционного периода равного 0,001 с.

1. Векторные системы управления электроприводами: учебное пособие / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 158с.
2. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. - М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 267с.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКА В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ НУЖД 3D-ПЕЧАТИ**

**Веренич Е.А.<sup>1</sup>, Позднякова А.И.<sup>1</sup>, Прохорович С. С.<sup>2</sup>, Очеретний А.М.<sup>1</sup>, Гриневич А.И.<sup>1</sup>**

1) УО «Национальный Детский Технопарк»,  
Минск, Республика Беларусь

2) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

В современном мире загрязнение окружающей среды пластиковыми отходами одна из самых серьёзных экологических угроз, стоящих перед человечеством. Существуют различные способы его утилизации. Например, захоронение, при котором пластмасса размещается в назначенном месте для хранения в течение неограниченного срока. Или сжигание, из-за чего в процессе термодеструкции полимера образуются различные токсичные газы, например, аммиак, оксиды азота, хлористый водород, диоксины и др [1]. Несложно заметить, что такие способы утилизации наносят ещё больший вред. В этом случае переработка является наиболее рациональным способом утилизации пластмасс. Учитывая рост рынка 3D-печати возможность повторного использования пластиковых отходов позволяет сократить расходы на филамент, а также его себестоимость в целом.

Исходя из этого появилась идея разработки автоматизированной системы переработки пластика. Разработанный переработчик состоит из двух основных модулей: шредера и экструдера, и такое объединение позволяет осуществлять полный цикл переработки — от твёрдых пластиковых отходов до готового филамента, пригодного для повторного использования в 3D-принтерах.

Первым делом остатки пластика требуется перемолоть в мелкий порошок. В таком состоянии будет проще с ним взаимодействовать. Для этого предназначен шредер, который представляет из себя набор конических шестерен с ведущим зубчатым колесом. Для движения полной конструкции шредера достаточно запустить один вал, а второй начнёт крутиться при помощи ведущего зубчатого колеса.

Следующим шагом была смоделирована платформа для экструдера. Сам экструдер будет представлять из себя шнек, который будет по соплу переносить пластик к нагревательным элементам, которые в итоге будут выводить готовый филамент. При помощи шагового двигателя будет приводиться в движение шнек. Основным компонентом управления экструдера является реле. При запуске автоматически запускается процесс нагревания хотенда и продолжается до тех пор, пока на датчике температуры не будет достигнута определённая температура. После её

достижения, срабатывает релейный модуль, который запускает систему охлаждения (вентилятор).

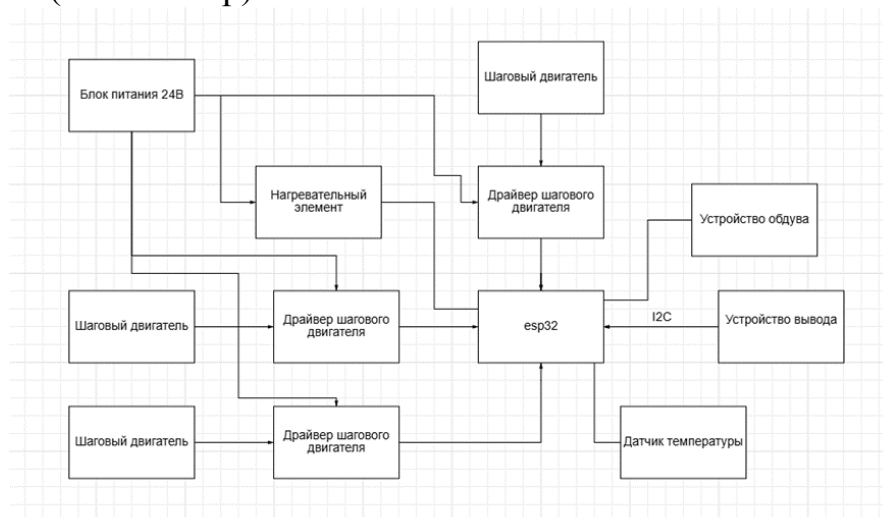


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы

Для управления подобной системой используется ESP32 (рис. 1). Для управления различными частями конструкции используются шаговые двигатели Nema 23 и драйвера TB6600. Использование данных шаговых двигателей обусловлено расчётом их момента силы.

Также был создан Telegram-бот, благодаря которому пользователь может узнать температуру нагрева экструдера, мощность, с которой работает каждый их шаговых двигателей, а также состояние автоматизированной системы. Помимо этого, были проработаны отдельные заранее заготовленные сценарии для переработки различных видов пластика [2]. В зависимости от типа пластика, требуется разная скорость работы шаговых двигателей, а также требуется разная температура нагревания. Кроме управления при помощи предоставляемого Telegram-ботом интерфейса, есть потребность в реализации физической системы управления. Для этого используются дополнительные кнопки. Для управления станком будет использоваться концепция «курсора», т.е. на дисплее перед изменяемым параметром будет отображаться символ «<>».

Для отображения информации о состоянии системы ещё используется OLED-дисплей с разрешением 128 на 32 пикселя, выполненный по технологии OLED, не требующей внешней подсветки, и дисплей подключён по шине I2C. Система охлаждения реализована с использованием вентиляторов размером 120 миллиметров, обеспечивающих поддержание определённой температуры сопла и охлаждение готового филамента перед намоткой.

1. Утилизация изделий из пластика /А.А.Шевцова URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/01/62753>(дата обращения: 23.02.2026).

2. Веренич Е.А., Позднякова А.И. Экологически ориентированные автоматизированные системы переработки пластика// - НАУЧНЫЙ ФОРУМ. 2026. URL: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2026/02/МК-2599.pdf>

## ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕГРУЗКИ

Воюш Н.В., Германович А.П., Данильчик А.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Применение робототехнических комплексов в технологических процессах, к которым предъявляются высокие требования к точности и плавности движения, например, гравировка, дозирование или фрезерование, становится всё более популярным на современных производствах. Для создания управляющих программ для сложных операций применяются САМ-системы [1], которые представляют траекторию движения в виде дискретного набора точек, передаваемых в систему управления промышленного робота. Параметры дискретизации траектории напрямую влияют на динамику движения звеньев манипулятора. При недостаточно мелкой дискретизации возникают резкие изменения скорости и ускорения, что приводит к снижению качества обработки, росту вибраций, увеличению износа механических узлов. При чрезмерно высокой плотности точек наблюдается увеличение объема управляющих данных и вычислительной нагрузки на систему управления, на которое система может быть не рассчитана. В связи с этим актуальным вопросом становится задача влияния шага дискретизации траектории на динамические перегрузки и выработка рекомендаций по выбору оптимальных параметров траектории при подготовке управляющих программ. Рассмотрим идеализированную модель движения без учета внешних силовых возмущений, таких как сила резания или сопротивление материала. Траектория движения рабочего органа задается в виде последовательности пространственных точек, где шаг дискретизации определяется расстоянием между соседними точками:

$$\Delta s_i = \| p_{i+1} - p_i \| = \Delta s = const$$

Ключевым показателем плавности движения является рывок, который характеризует скорость изменения ускорения. Он напрямую связан с возбуждением вибраций в механической системе робота:

$$j_i = (a_{t+1} - a_t) / \Delta t$$

При увеличении шага дискретизации траектории разность между векторами скорости в соседних точках возрастает, что приводит к скачкообразному изменению ускорения и увеличению рывка. Наиболее заметно это явление на участках с высокой кривизной. Для

количественной оценки динамических перегрузок может быть использован среднеквадратичный показатель рывка [2]:

$$J_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|j_i\|^2}$$

Таким образом, при уменьшении дискретизации значение  $J_{rms}$  существенно снижается, что свидетельствует о более плавном движении и снижении динамических нагрузок. Далее этот параметр необходимо подстраивать под требования конкретных технологических операций. На примере файла с пространственными точками траектории строим график изменения модуля рывка рабочего органа в зависимости от изменения шага, где во время второго испытания увеличиваем плотность точек в 5 раз (рисунок 1).

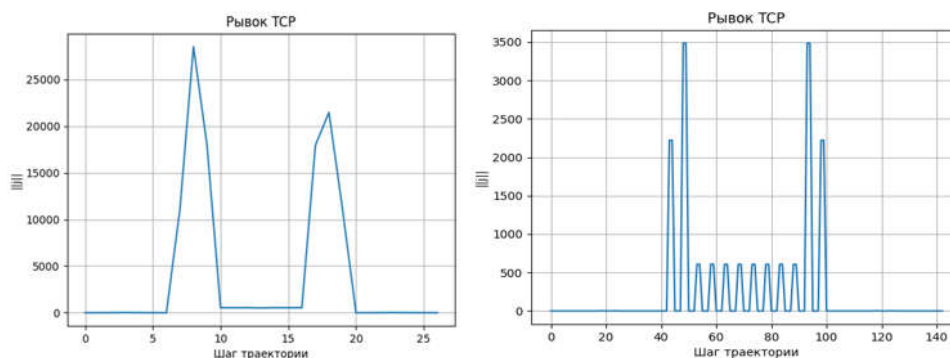


Рисунок 1 – Итоговые графики зависимостей

Проведенный анализ показал, что дискретизация траектории существенно влияет на динамические характеристики движения TCP. При малом числе точек возникают завышенные пиковые значения рывка, тогда как увеличение плотности точек снижает динамические перегрузки и позволяет выявить реальную структуру изменения рывка вдоль траектории. Корректный анализ динамики движения невозможен без достаточной дискретизации и сглаживания траектории. Далее, опираясь на полученные графики, можно делать выводы об оптимальной плотности точек, удовлетворяющей критериям точности перемещений робота, а также объеме полученной управляющей программы.

1. Groover, M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing / M. P. Groover. – 4th ed. – Boston : Pearson Education, 2016. – 816 p.
2. Siciliano, B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. – London : Springer, 2010. – 632 p

## **ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛЭП В ГЕОИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА**

**Воюш Н.В., Кравченко В.В., Королева М.Н., Сухобоков А.А.**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь.

В настоящее время актуальной задачей является автоматизация мониторинга линий электропередачи с целью своевременного выявления дефектов и снижения эксплуатационных рисков. Для решения данной задачи была разработана нейросетевая модель обнаружения неисправностей ЛЭП на основе архитектуры YOLO, предназначенная для обработки изображений, полученных с беспилотных летательных аппаратов [1]. Модель выполняет детекцию дефектов элементов линии и формирует ограничивающие рамки объектов на цифровых изображениях. Результатом обработки являются координаты в пиксельной системе координат и вероятностные оценки принадлежности к заданным классам дефектов. Для повышения практической значимости результатов детекции целесообразна их интеграция в геоинформационную систему пространственного анализа, обеспечивающую хранение, визуализацию и обработку пространственных данных [2].

Интеграция модели в геоинформационную среду предполагает реализацию механизма привязки результатов детекции. При аэрофотосъёмке БПЛА формируются навигационные данные, включающие географические координаты центра кадра, высоту съёмки, параметры ориентации камеры и фокусное расстояние. На основе этих параметров строится модель центральной проекции, позволяющая выполнить переход от пиксельных координат ограничивающей рамки к пространственным координатам на поверхности объекта. Преобразование осуществляется с использованием матрицы внутренней и внешней калибровки камеры и расчёта пересечения луча зрения с моделью рельефа или плоскостью размещения объекта. В результате формируются географические координаты центра дефекта, которые сохраняются в виде пространственных объектов с атрибутивными характеристиками в базе данных ГИС [3].

Для уточнения пространственного положения дефектов применяется сопоставление результатов детекции с облаками точек, полученными при трёхмерной съёмке трассы ЛЭП. Облако точек содержит координаты элементов инфраструктуры в трёхмерном пространстве. Пространственная корреляция осуществляется путём поиска ближайших точек в заданном радиусе относительно рассчитанных координат дефекта. На основе плотности и распределения точек определяется принадлежность дефекта конкретному конструктивному элементу: опоре, траверсе или проводу.

Дополнительно вычисляются высотные отметки, углы наклона и расстояния до соседних объектов, что позволяет проводить количественную оценку состояния элементов линии.

Использование данных лазерного сканирования (LiDAR) [4], установленного на БПЛА, обеспечивает формирование высокоточной трёхмерной модели трассы. Лазерное сканирование позволяет получать пространственную информацию независимо от освещённости и текстурных особенностей поверхности. Интеграция LiDAR-данных с результатами нейросетевой обработки реализуется посредством приведения всех данных к единой системе координат и пространственной регистрации наборов данных. Совмещение облака точек с геопривязанными результатами детекции повышает точность локализации дефектов и обеспечивает возможность анализа расстояний до растительности, пересечений с инженерными коммуникациями и оценки габаритных отклонений.

Передача данных между модулями осуществляется в структурированном формате, содержащем координаты, класс дефекта, вероятностную оценку и дополнительные пространственные параметры [5].

Таким образом, использование нейросетевой модели детекции дефектов ЛЭП в сочетании с геоинформационной системой пространственного анализа позволяет обеспечить переход от обработки изолированных изображений к формированию структурированных пространственных данных о состоянии инфраструктуры. Интеграция результатов детекции в ГИС повышает информативность мониторинга, обеспечивает точную локализацию выявленных дефектов и создаёт основу для комплексного анализа технического состояния линий электропередачи.

1. Воюш Н.В., Сухобоков А.А. Автоматизация обнаружения неисправностей на ЛЭП с помощью компьютерного зрения. Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы XI международной научно-практической конференции: совместно с МинскЭкспо в рамках выставки «Автоматизация, электроника – 2024», Минск, 2024 / Белорусский национальный технический университет. – Минск: Бизнесофсет, 2024.. – С. 29–30.

2. Краснов В.П., Иванов С.А. Методы автоматизированного мониторинга линий электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – с 156.

3. Миллер Д., Робертсон А. Глубокое обучение для обнаружения дефектов инфраструктуры. – М.: Наука, 2021. – с 142.

4. Шмидт К., Петерсен Ф. LiDAR и облака точек для мониторинга энергетической инфраструктуры. – Геоинформационные системы и технологии, 2019. – С. 23–31.

5. Танака Н., Suzuki Y., Saito T. Автоматическое обнаружение повреждений объектов на основе беспилотных летательных аппаратов. : Научная библиотека, 2020. – с 68.

## **ГИБРИДНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**Гу Пэнхао**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Благодаря способности к вертикальному взлету и посадке, простоте механической конструкции и высокой маневренности, мультироторные БПЛА нашли широкое применение в военной разведке, точном земледелии, логистике и спасательных операциях. Однако данные системы обладают существенно нелинейной динамикой, сильной связанностью каналов и являются недоопределенными. В сочетании с параметрическими возмущениями, внешними ветровыми нагрузками и изменением полезной нагрузки это создает серьезные вызовы при проектировании систем управления.

Традиционные ПИД-регуляторы, благодаря простоте реализации, остаются основным инструментом в промышленности. Однако их параметры обычно настраиваются для конкретных условий эксплуатации. При изменении условий полета или задачи качество управления может значительно ухудшиться, требуя повторной ручной настройки. Для решения этой проблемы в последние годы были предложены различные продвинутое стратегии: скользящие режимы, модельно-прогнозирующее управление, метод обратной задачи и активное подавление возмущений (ADRC).

Метод активного подавления возмущений рассматривает внутреннюю неопределенность модели и внешние возмущения как "обобщенное возмущение", которое оценивается расширенным наблюдателем состояния и компенсируется в обратной связи. Это снижает требования к точности математической модели и обеспечивает высокую робастность. Однако эффективность ADRC критически зависит от настройки параметров наблюдателя и регулятора, которые обычно подбираются эмпирически.

В то же время, экстремальное управление представляет собой метод адаптивного управления, не требующий знания модели. Путем введения пробных сигналов он позволяет в реальном времени искать оптимальные параметры, минимизирующие заданный функционал качества, что открывает новые возможности для автоматической настройки регуляторов.

Основная особенность данного подхода заключается в следующем: 1) предложена гибридная структура, объединяющая способность системы к онлайн-оптимизации с помехоподавляющими свойствами; 2) построена полная динамическая модель квадрокоптера и сделан вывод закона управления; 3) проведено сравнение путем моделирования предложенного метода с традиционными подходами с точки зрения точности слежения и адаптивных свойств.

## **ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Гу Пэнхао**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) основан на модели в пространстве состояний. Путем решения уравнения Риккати он находит оптимальную матрицу обратной связи по состоянию, что позволяет минимизировать функционал, учитывающий, как точность управления, так и затраты энергии. Однако LQR предъявляет высокие требования к точности модели и обладает ограниченной робастностью

Модельно-прогнозирующее управление (MPC) решает задачу оптимизации на конечном горизонте времени в реальном времени, что позволяет явным образом учитывать ограничения системы. MPC демонстрирует высокую эффективность в задачах траекторного слежения и обхода препятствий.

Управление со скользящим режимом (SMC) обеспечивает полную робастность к параметрическим возмущениям и внешним воздействиям за счет принуждения системы к движению вдоль специально сконструированной поверхности скольжения. Комбинация SMC с наблюдателями возмущений эффективно подавляет нежелательные эффекты, обеспечивая точность позиционирования в заданных пределах при изменяющейся нагрузке.

Нейросетевые регуляторы используют аппроксимирующие способности нейронных сетей для изучения обратной динамики БПЛА или прямой карты управляющих сигналов без необходимости точной модели. Гибридные ANN-ПИД регуляторы, динамически настраивающие коэффициенты ПИД-регулятора с помощью нейронной сети, демонстрируют снижение установившейся ошибки по сравнению с классическим в нелинейных средах.

Глубокое обучение с подкреплением (Deep RL) позволяет БПЛА обучаться оптимальным стратегиям управления в процессе взаимодействия со средой. Гибридные архитектуры, объединяющие обученные алгоритмы с классическими методами, способны решать сложные задачи в незнакомых условиях.

Нечеткое управление трансформирует экспертные знания в нечеткие правила, что удобно для работы с неопределенностью и качественной информацией. Адаптивные нечеткие регуляторы, оптимизируемые эволюционными алгоритмами, могут подстраивать параметры управления в реальном времени.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**

**Гутич И.И., Матрунчик Ю.Н., Жерко В.Е.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

Контроль качества является ключевым этапом промышленного производства, напрямую влияющим на безопасность, надёжность и конкурентоспособность продукции. В таких отраслях, как кабельная промышленность, машиностроение, электроника и производство строительных материалов, визуальный контроль используется для выявления дефектов поверхности, геометрических отклонений и нарушений маркировки. Традиционный ручной осмотр остаётся распространённым, однако он характеризуется субъективностью, ограниченной скоростью и зависимостью от человеческого фактора, что повышает вероятность пропуска дефектов и снижает воспроизводимость результатов.

Системы автоматизированного визуального контроля (АОІ — Automated Optical Inspection) на основе компьютерного зрения позволяют устранить данные ограничения. Такие системы используют цифровые камеры и алгоритмы обработки изображений для анализа продукции в реальном времени. Они способны обеспечивать стабильную точность контроля, высокую скорость обработки и объективность результатов, что делает их важным элементом современной промышленной автоматизации и концепции Industry 4.0[3].

В последние годы ключевым направлением развития автоматизированного контроля качества стало применение методов глубокого обучения. Сверточные нейронные сети (CNN) позволяют извлекать сложные визуальные признаки и обнаруживать дефекты, которые трудно формализовать классическими алгоритмами. В отличие от традиционных методов машинного зрения, основанных на пороговой обработке, анализе контуров или шаблонном сопоставлении, нейросетевые модели способны адаптироваться к изменениям освещения, текстуры и формы объектов[1].

Одним из наиболее эффективных подходов в промышленной инспекции является обнаружение аномалий. В этой парадигме модель обучается на изображениях качественной продукции и формирует статистическое представление нормы. Любое отклонение от этого распределения интерпретируется как потенциальный дефект. Такой подход особенно полезен в производственных условиях, где заранее невозможно перечислить все возможные виды брака[2]. Методы обнаружения аномалий широко применяются для контроля поверхностей, текстур, сварных швов и кабельной изоляции.

Для обучения и оценки моделей используются специализированные промышленные наборы данных, такие как MVTec AD, содержащие изображения реальных объектов и типичных дефектов. Использование эталонных датасетов позволяет объективно оценивать точность алгоритмов и сравнивать различные методы обнаружения дефектов[2].

В кабельной промышленности автоматизированные системы компьютерного зрения применяются для выявления нарушений целостности изоляции, деформаций оболочки, дефектов маркировки и геометрических отклонений. Камеры высокого разрешения фиксируют изображение кабеля на производственной линии, после чего алгоритмы анализируют его структуру и выявляют отклонения[4]. Дополнительно могут вычисляться инженерные параметры, такие как диаметр кабеля, толщина изоляции и соосность жил, что позволяет контролировать соответствие продукции нормативным требованиям.

Автоматизированные системы визуального контроля обеспечивают ряд практических преимуществ: повышение скорости инспекции без остановки производственной линии; снижение доли пропущенных дефектов; документирование результатов контроля; накопление данных для анализа причин брака и оптимизации технологических процессов. Локальные решения позволяют обрабатывать данные непосредственно на предприятии, обеспечивая конфиденциальность и независимость от облачных сервисов[5].

Развитие технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения способствует переходу от выборочного контроля к непрерывному мониторингу качества продукции. Интеграция систем визуальной инспекции с производственными информационными системами позволяет формировать цифровые паспорта продукции и внедрять предиктивное управление качеством. Таким образом, применение систем распознавания изображений становится важным инструментом повышения эффективности и цифровой трансформации промышленности.

1. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. - М.: ДМК Пресс, 2018 - 652 с.

2. Bergmann P. et al. The MVTec Anomaly Detection Dataset: A Comprehensive Real-World Dataset for Unsupervised Anomaly Detection. CVPR, 2019. <https://www.mvtec.com/company/research/datasets/mvtec-ad>

3. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2022 - 979с. <https://szeliski.org/Book/>

4. Davies E. R. Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Academic Press, 2018 – 936 с.

5. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. <https://www.iso.org/standard/62085.html>

## УНИФИЦИРОВАННЫЙ ФОРМАТ ОПИСАНИЯ РОБОТОВ (URDF)

Дербан А.Н.<sup>1</sup>, Бусько А.М.<sup>2</sup>

- 1). Белорусский национальный технический университет;
- 2). Иностранное производственное унитарное предприятие

«Дана Нетворкс»

Минск, Республика Беларусь

URDF (Unified Robot Description Format) позволяет представить спецификацию роботов в формате XML (eXtensible Markup Language - расширяемый язык разметки). Спецификация охватывает следующие возможности: кинематическое и динамическое описание робота, визуализацию робота, модель коллизий (столкновений) робота.

Описание робота представляет собой совокупность элементов типа <link> (звено) и <joint> (сочленение). В свою очередь <link> хранит информацию о геометрических и массогабаритных характеристиках звена, его ориентации в пространстве, а также данные о материале и расчете коллизий. Сочленения определяют тип механического взаимодействия между звеньями (фиксированное, вращательное, линейное, плавающее и т.д.), есть ли пределы линейного и углового перемещения в сочленении, параметры калибровки и скорости перемещения.

В рамках иерархии элементов, обрабатываемых на основе XML, реализуется схема родительских и дочерних элементов, отражающих особенности взаимодействия звеньев через сочленения. Схематически можно визуализировать модель взаимодействия звеньев с использованием графов, отражая, таким образом, древовидную кинематическую структуру. На основе формата URDF контролируются кинематические замкнутые цепи, т.е. ситуации, когда тэг <link> имеет два родительских элемента и таким образом нарушает целостность формата описания робота.

Кроме обязательных элементов спецификация URDF содержит ряд сущностей, которые могут заполняться по необходимости. Например, теги <material>, <gazebo>, <transmission> соответственно раскрывают информацию о материале, параметрах эмуляции и особенностях реализации сочленений в части приводов и редукторов соответственно. Сообщество разработчиков постоянно совершенствует и развивает формат, дополняя новыми тегами, например, в процессе реализации находятся секции <sensor> (датчики) и <model\_state> (группы сочленений).

Для разработки файлов соответствующего формата можно использовать как специализированные среды разработки, так и любой доступный текстовый редактор с поддержкой XML. Формат URDF широко используется в различных средах симуляции робототехнических решений, включая программное обеспечение с открытым исходным кодом Gazebo (проект ROS – robotics operating system), а также коммерческие среды моделирования, такие как SolidWorks и PTC Creo.

## ЛЕГКОВЕСНЫЙ ПРОТОКОЛ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Дербан А.Н.<sup>1</sup>, Бусько А.М.<sup>2</sup>

- 1). Белорусский национальный технический университет;
- 2). Иностранное производственное унитарное предприятие  
«Дана Нетворкс»  
Минск, Республика Беларусь

Эффективный информационный обмен в рамках взаимодействия между участниками в распределенной автоматизированной среде становится с каждым годом актуальнее, особенно с учетом развития интернета вещей (IoT), а также в рамках решения задач управления, применительно к группам роботов.

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) – представляет собой протокол взаимодействия между техническими системами в условиях ограниченной пропускной способности и нестабильной связи. Основная реализация MQTT функционирует на базе стека TCP/IP, однако есть специфичные реализации для его использования в рамках Bluetooth, UDP, ZigBee, IoT, а также для сетей, не основанных на TCP/IP.

Отправка сообщений протокола MQTT осуществляется на основе модели «издатель – подписчик» (pub/sub), т.е. обмен информацией осуществляется между сервером – издателем и одним или несколькими клиентами. Количество серверов, публикующих сообщения, а также число клиентов и их расположение в распределенной среде не регламентируется. Защита передаваемых данных осуществляется по средствам использования модулей Secure Sockets Layer (SSL), причем с учетом работы в рамках слабых по производительности центрального процессора систем.

MQTT реализует своеобразную иерархию каналов связи, где есть возможность указать при отправке данных специальные параметры, контролирующие прием информации клиентами, что позволяет упростить информационный обмен порциями данных от 2 байт до 256 мегабайт. Поскольку рассматриваемый протокол является бинарным, то информация будет передаваться в двоичном формате, что в свою очередь предусматривает интерпретацию данных, например, на основе расширения Ably для JavaScript.

Организованные каналы используют адресацию, которая очень похожа на обращение к данным в рамках иерархии файловой системы, что позволяет гарантировать доставку сообщений клиентам с учетом фильтрации информации.

Для инфраструктуры IoT MQTT реализует несколько вариантов использования: сбор информации с датчиков, контроль работоспособности действующих узлов, реализация функционала биллинговых систем.

## **ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В ВЕТЕРИНАРИИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА**

**Долгий А. А., Нитиевский С. А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Особенностью ветеринарной работы с крупным рогатым скотом является сам размер особей. Медицинскому персоналу не хватает удобства, а, следовательно, и лечение, оказываемое животным, может быть осуществлено недолжным образом, что может приводить к возникновению осложнений, трудному восстановлению после лечения и ухудшению состояния в целом. Для решения данной проблемы было разработано устройство для более удобного позиционирования крупного рогатого скота в пространстве относительно человека. В простонародье названное «коровьим переворачивателем», это специализированное сельскохозяйственное оборудование, официально называемое «станком для обработки копыт с функцией опрокидывания» (далее аппарат для позиционирования крупного рогатого скота), которое на самом деле намного сложнее, чем кажется. [1]

Аппарат для позиционирования крупного рогатого скота представляет из себя систему, состоящую из трехмерной рамы, зачастую из металлических труб с подкладками, передаточного механизма и движителя. Существуют различные способы, при помощи которых движение может быть передано на передаточный механизм. Это может быть как реализация устройством, крепящимся на трактор и использующим мощность, взятую со специального вала отбора мощности, так и независимая от сельхозтехники отдельная механизаторская единица. В этом случае зачастую применяется электродвигатель. Помимо двигателей, электропривод системы позиционирования крупного рогатого скота зачастую состоит из гидравлических систем и прочих устройств перераспределения механической энергии в основном передаточном механизме. Крупный рогатый скот крепится на раме при помощи кожаных ремней, в основном за ноги, туловище, шею и голову. Данный тип крепления не приносит вреда либо значительного дискомфорта животному, обеспечивает надежное удержание и минимизирует нежелательное движение. Данные устройства должны быть выполнены в соответствии с требованиями безопасности оператора установки и животного.

Требованиями к такому аппарату будет медленная скорость работы (переворот из вертикального положения в горизонтальное около 30 секунд, то есть 3°/с) и четкое позиционирование, чтобы не причинить вреда животному и обеспечить ветеринару удобство работы. Мощность электродвигателя в данном случае должна быть достаточной, чтобы

выдерживать нагрузку весом крупного рогатого скота без перегрева или выхода двигателя из строя во время манипуляций. В положениях, которые можно считать конечными, удерживающая рама блокируется механическим тормозом, либо же гидравлической системой, снимая нагрузку с двигателя.

В качестве электродвигателей в электроприводе установки для позиционирования крупного рогатого скота целесообразно использовать асинхронные двигатели либо двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Асинхронные двигатели являются более конструктивно простыми, а значит и надежными, однако двигатели с постоянными магнитами обладают лучшими энергетическими показателями и показателями качества регулирования, а также лучшими массогабаритными показателями, что может быть важно при конструировании мобильных версий установок. Кроме того необходимо учитывать, что электропривод на основе асинхронного двигателя можно выполнить с простейшими системами управления на основе релейно-контакторных схем, в том числе и с реостатным регулированием скорости (при необходимости), а электропривод на основе двигателей с возбуждением от постоянных магнитов обязательно должен содержать инвертор с системой управления, идентифицирующей положение ротора, что налагает определенные ограничения, увеличивает стоимость системы и снижает ее надежность. С другой стороны, применение инвертора открывает возможности создания систем электропривода с питанием от аккумуляторных батарей, что может быть актуально при проектировании автономных установок. Вопрос выбора типа электропривода в таком случае сводится к удовлетворению требований заказчика к каждой конкретной проектируемой установке, которые могут формулироваться в зависимости от различных технических и экономических факторов [2].

Не менее важную роль будет играть исполнение электропривода по степени защиты от внешних факторов. Электродвигатель, преобразователь, устройства управления и защиты установки должны работать в условиях, где распространены отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота, жидкости различных характеров, пыль и т.д. В современном мире принята классификация IP (Ingress Protection), которая различает несколько категорий защиты по уровню их противодействия проникновению инородных тел и веществ. Минимальная степень защиты для двигателя и устройств управления рассматриваемого устройства обычно должна быть не менее чем IP44. Это также является крайне важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании электропривода.

1. Compass Veterinary Livestock Services: [Электронный ресурс] URL: <https://compassvets.com.au>. (Дата обращения: 23.02.2026).

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

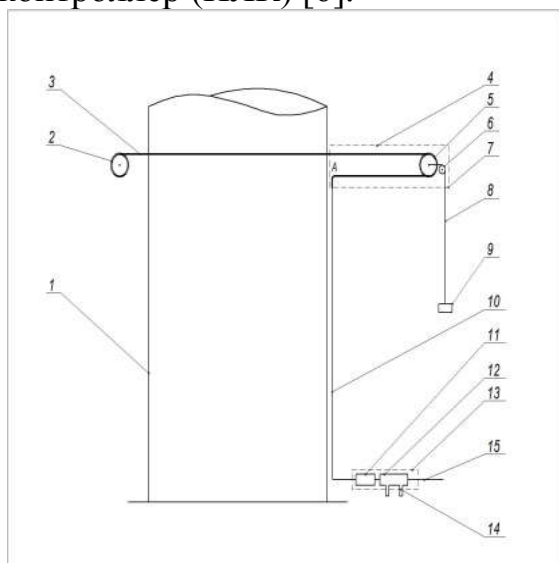
Емельянчиков В.И., Опейко О.Ф., Елисеенко Ю.Ю.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

В Беларуси выбросы загрязняющих веществ через дымовые трубы газовых котлов мощностью 50МВт и больше (примерно 1% от числа источников выбросов) контролируются автоматизированными системами *непрерывного* контроля выбросов (АСНКВ). Выбросы котлов меньшей мощности контролируются *периодически* лабораториями Республиканского центра аналитического контроля (РЦАК) и ведомственными лабораториями вручную. Контроль выбросов требует подъема на 25 м персонала лабораторий на рабочие площадки к измерительным портам [1]. Количество точек отбора проб может быть от 4 до 20 в зависимости от диаметра измерительного сечения трубы (от 0,35 до 15 м) [2]. К недостаткам этого контроля следует отнести длительность измерений до 3-4 часов, и трудоемкость, особенно при максимальном количестве работающих котлов в зимний период и, как следствие, значительную их стоимость. Следовательно, актуальна автоматизация такого контроля выбросов загрязнений в атмосферу.

Для автоматизации предлагаются способы отбора проб с гибким зондом [3-5]. Один из способов показан на рисунке 1. Электропривод перемещения зонда позволит управлять процессом алгоритмически, применяя программируемое реле либо программируемый логический контроллер (ПЛК) [6].



а



б

Рисунок 1 – Применение гибкого зонда с блок-роликом, а –пробоотборная система, б – лабораторный макет

На рисунке 1, а представлено применение в дымовой трубе 1 сервопривода 2 для передвижения посредством троса 3 начала гибкой трубки 4 зонда. Перемещение блок-ролика 5 выполняется с опорой на неподвижный блок-ролик 6 внутри электрообогреваемого короба 7 посредством троса 8 и противовеса 9. Транспортирование пробы происходит по обогреваемой линии 10 побудителем расхода 11. Устройства 12 - 15 доставляют газовую пробу в газоанализатор, а избыток сбрасывают в атмосферу. На рисунке 1, б показан лабораторный макет автоматического гибкого зонда.

Предложенный способ обеспечивает следующие преимущества.

Проба подается на газоанализатор внизу, а не на высоте. Персоналу лабораторий не нужно подниматься на рабочую площадку к точке отбора проб. Время измерений сокращается до 20 минут.

Разработанное программное обеспечение управления движением зонда позволит обеспечить гибкость аналитического контроля выбросов, изменяя при необходимости график перемещений.

Носимый (для ведомственных лабораторий) и возимый (для надзорно-контролирующих лабораторий РЦАК) программно-аппаратные комплексы, дополняющие пробоотборные системы, устанавливаемые на дымовых трубах, позволяют создать автоматизированную систему периодического контроля выбросов загрязняющих веществ топливосжигающего оборудования в атмосферный воздух.

Автоматизированная система существенно уменьшит трудоемкость контроля выбросов для персонала при значительном повышении эффективности и удешевлении контроля.

1. ЭкоНиП 17.01.08-001-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой).

2. МВН 1003-2017. Методика выполнения измерений с использованием газоанализаторов с электрохимическими датчиками.

3. Емельянчиков В.И., Елисеенко Ю.Ю. Автоматические гибкие зонды и системы непрерывного контроля и учета выбросов вредных веществ дымовых труб тепловых электростанций // Экологические системы и приборы. – 2020. №6. С.3 – 11.

4. Емельянчиков В. И., Елисеенко Ю.Ю. Устройство для отбора проб из газового потока. Патент Беларуси на полезную модель № 11329 МПК G 01N 1/22, подана 16.08.2016.

5. Емельянчиков В.И., Елисеенко Ю.Ю. Пробоотборные системы дымовых газов тепловых электростанций и котельных // Экология на предприятии – 2023. №7 (145). С. 87-91.

6. Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы / Емельянчиков В. И., Лойкуц Е. Э., Опейко О. Ф. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2024. -Т. 67, № 3. С. 228–240.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ

**Жук А.Н., Власов В.В., Шаталов И.М.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В Республике Беларусь используются порядка 350 лазерных комплексов, обеспечивающих разрезку около 110–140 тыс.т. листовой стали. Для резки стали необходимо предварительно очистить и подготовить стальную поверхность, одной из эффективных очисток является реверсивно-струйная очистка (РСО). Исследование дефектов и является важной задачей после проведения РСО.

Дефекты на поверхности исследовались по методу темного поля. Этот метод применяется чаще всего для изучения в отраженном свете металлических шлифов. Для исследования дефектов на поверхности и микроструктуры использовались образцы из стали Ст3пс размером 100×100 мм с различными технологиями поверхностной обработки (таблица 1).

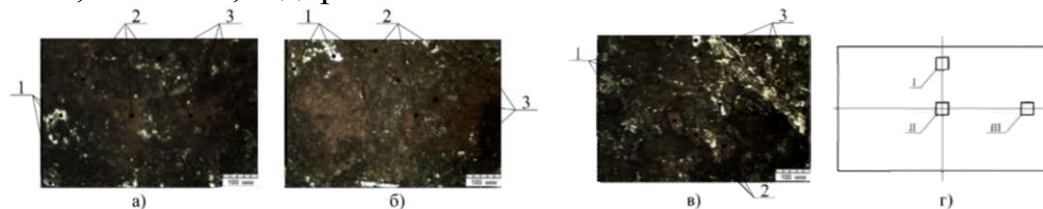
Таблица 1 – Виды и параметры поверхностной обработки образцов  
(материал – Ст3пс), используемых для исследования дефектов на  
поверхности образцов

№ образца	Параметры поверхностной обработки
1	Поверхность образца из листового материала в состоянии поставки, параметр шероховатости $Ra = 20-30$ мкм.
2	2.1. РСО образцов рабочей суспензией на основе технической воды с применением речного песка с концентрацией $K_{р.п.} = 8\%$ и полиакриламида с концентрацией $K_{п.} = 10^{-4}-10^{-5}\%$ . 2.2. Сушка после РСО при температуре $T_0 = 20$ °С.
3	I этап 3.1. РСО образцов рабочей суспензией на основе технической воды с применением речного песка с концентрацией $K_{р.п.} = 8\%$ и полиакриламида с концентрацией $K_{п.} = 10^{-4}-10^{-5}\%$ . II этап 3.2. Промывка очищенной поверхности реверсивной водной струей (вода 100 %). 3.3. Сушка очищенной поверхности при температуре $T_0 = 20$ °С в течение $t_c = 24$ ч.

4	<p>I этап</p> <p>4.1. РСО образцов рабочей суспензией на основе технической воды с применением речного песка с концентрацией <math>K_{р.п.} = 8 \%</math> и полиакриламида с концентрацией <math>K_{п.} = 10^{-4} - 10^{-5} \%</math>.</p> <p>II этап</p> <p>4.2. Промывка очищенной поверхности реверсивной водной струей (техническая вода 100 %).</p> <p>III этап</p> <p>4.3. РСО образцов рабочей суспензией на основе технической воды с применением бентонитовой глины с концентрацией <math>K_{б.} = 3,5 \%</math> и кальцинированной соды <math>K_{к.с.} = 1 \%</math>.</p> <p>4.4. Сушка очищенной поверхности при температуре <math>T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math> в течение <math>t_c = 24 \text{ ч.}</math></p>
Параметры обработки: давление $p_{вх} = 20 \text{ МПа}$ ; $L = 30 \text{ мм}$ ; $d_c = 1,2 \text{ мм}$ .	

Для образца № 1 в состоянии поставки (рисунок 1) было установлено, что поверхность имеет множество дефектов (окалина, коррозия, задиры и т. д.), которые четко проявляются при съемке по методу темноканального освещения.

Поверхность образцов № 2, 3, 4 после обработки по режимам, приведенным в таблице 1, представлена на фотографиях (рисунок 2, а, б, в). Из фотографий на рисунке 2, а, б, в видно, что поверхность образца № 4 обработана наиболее равномерно. На ней отсутствуют дефекты типа коррозии, окалина, задиры.

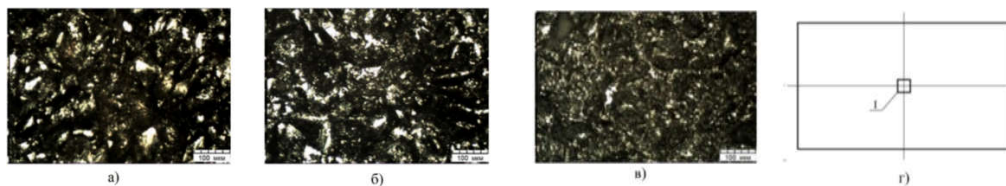


1 – задиры; 2 – продукты коррозии; 3 – окалина; а, б, в – фотографии поверхности на участках шлифа I, II, III; г – схема расположения участков I, II, III на поверхности шлифа: (x200)

Рисунок 1 – Фотографии поверхности образца № 1 (нумерация по данным таблицы 1) из стали Ст3пс в состоянии поставки

Рельефность поверхности образца № 4 (рисунок 2, в) характеризуется высокой сглаженностью, имеет практически однородный матовый цвет, что можно объяснить силовым воздействием частиц бентонита, которые за счет своей пластической деформации и возникающих при этом значительных сил контактного трения приводят к уменьшению значения среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  на площадке соударения. Поверхность образцов № 2, № 3 (рисунок 2, а, б) имеет рельеф более контрастный, менее сглаженный, существенно неоднородный, что можно объяснить жестким режущим (скользящим) воздействием абразивных частиц речного песка на достаточно коротком пути

контактного взаимодействия с практически хрупким разрушением абразивных песчинок.

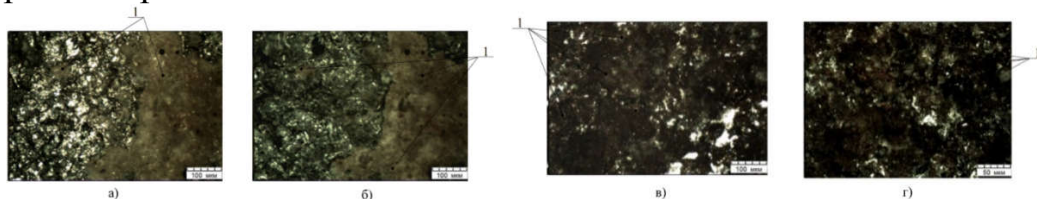


а, б, в – фотографии поверхности образцов 2, 3, 4 соответственно после обработки по режимам, приведенным в таблице 1 на участке шлифа I;

г – схема расположения участка I на поверхности шлифа (x200)

Рисунок 2 – Фотографии поверхности образцов из Ст3пс после различных видов поверхностной обработки

Дополнительно следует отметить то обстоятельство, что матовый цвет металлической поверхности образцов № 4 обусловлен образованием на ней тонкого пленочного покрытия, которое блокирует протекание на обработанной поверхности окислительных процессов с образованием продуктов коррозии. В то же время на поверхностях образцов № 2, 3 (рисунок 3), которые были обработаны в режимах РСО (таблицу 1) без применения бентонитовой глины через, 72 часа после РСО и сушки при  $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$  четко просматриваются участки коррозии, которые весьма контрастно проявляются.



1 – элементы продуктов коррозии; а – поверхность образцов № 2 в светлопольном освещении; б – поверхность образцов № 2 в темнопольном освещении; в – поверхность образцов № 3 в светлопольном освещении;

г – поверхность образцов № 3 в темнопольном освещении

Рисунок 3 – Поверхность образцов № 2, 3, снятая по методу светлого и темного поля через 72 ч после РСО без бентонитовой глины

Формирование на поверхности шлифов из образцов № 2, 3 участков коррозии обусловлено исключением из технологического цикла финишного III этапа обработки с использованием рабочей суспензии с применением бентонитовой глины. Это приводит к отсутствию защитного пленочного покрытия, основу которого составляют химические соединения, входящие в состав бентонитовой глины. Ввиду отсутствия такого защитного покрытия интенсивно протекают окислительные процессы повторной коррозии с образованием оксидов железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , которые четко видны на рисунке 3.

1. Жук, А.Н. Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхностей стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой: дис. канд. техн. наук : 05.02.07 / А.Н. Жук. – Минск, 2022. – 201 л.

## ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

**Журавлёва Е.Р.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь.

Технологии распознавания лиц стали мощным инструментом безопасности, обеспечивающим автоматизацию и точность, недоступные человеческому глазу. Основные преимущества их использования:

- контроль доступа, исключая риск несанкционированного проникновения или передачи пропуска;
- ведение черных списков, позволяющих своевременно уведомить сотрудников отдела охраны о появлении нежелательных лиц;
- бесконтактная аутентификация, ускоряющая проход людей в часы пик, а также обеспечивающая гигиеничность процесса;
- доказательная база, позволяющая в случае инцидента произвести быстрый поиск конкретного человека в архиве видеозаписей.

Предложенная система включает следующие модули: модуль заполнения базы данных (далее БД), модуль генерации кодировок и интерфейс пользователя. Данное решение позволяет оптимизировать процесс распознавания лиц за счет распараллеливания потоков данных для заполнения БД и генерации кодировок.

Модуль заполнения БД имеет консольное исполнение, что продиктовано сферой применения системы – пункты пропуска в ВУЗ. Для университетской среды, где состав студентов ежегодно меняется, консольный модуль позволяет оптимизировать рутинные операции по обработке больших массивов фотографий. Такое исполнение дает возможность одним запуском скрипта обработать списки целых факультетов и проще интегрируется с уже имеющимися БД ВУЗа. Фотографии и данные хранятся в БД Firebase, позволяя консольному модулю работать с данными удаленно и обеспечивая синхронизацию между разными точками контроля в университете.

Алгоритм работы модуля заполнения БД представлен на рисунке 1а). После подключения библиотек и БД (код и файл-ключ генерируются на сайте Firebase [1]) объявляются переменные. Фотографии копируются в БД с помощью первого цикла «for». Второй цикл «for» осуществляет отправку данных в формате JSON. В приложении используется структура указанного формата - набор пар «ключ: значение».

Алгоритм работы генератора кодировок представлен на рисунке 1б). Генерацию кодировок осуществляет функция «findEncodings» из библиотеки «face\_recognition». Данная библиотека содержит встроенную нейронную сеть, обученную записывать 128 измерений, уникально описывающих черты лица [2]. В базе данных Firebase эти числа хранятся

как простой массив, что позволяет проводить идентификацию за миллисекунды, т.к. нет необходимости каждый раз обращаться к объемному файлу фотографии.

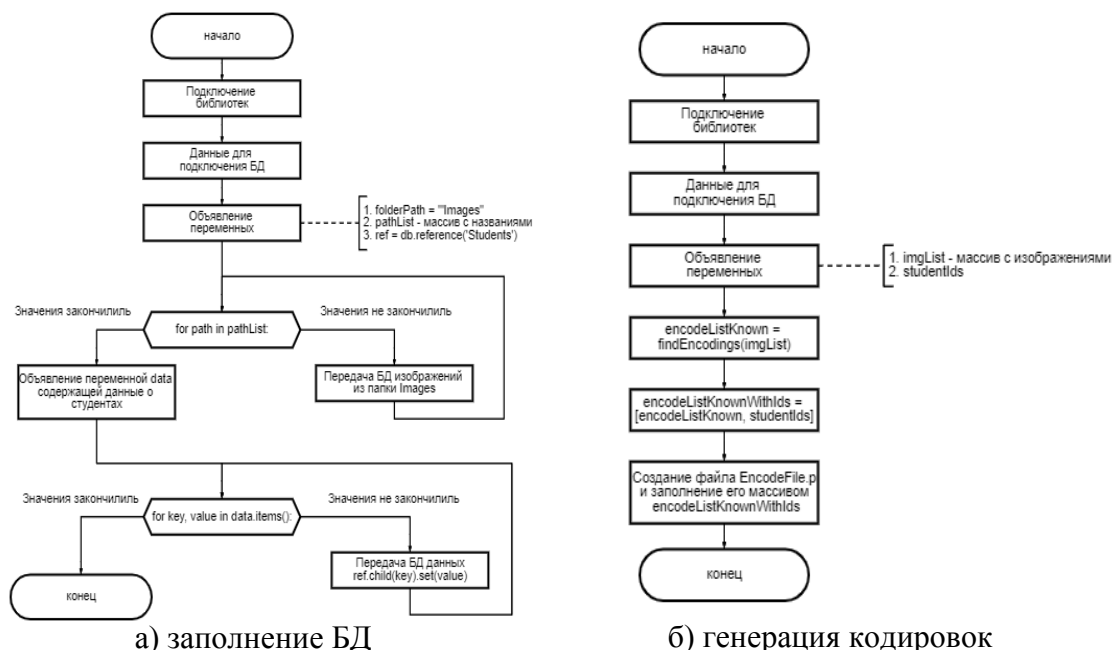


Рисунок 1 – Алгоритмы работы модулей системы распознавания лиц

Циклически обрабатывая изображения в массиве данных, система получает кодировки изображений и добавляет их в массив «encodeList». В результате создается файл «EncodeFile.p», содержащий номера студентов и их кодировки.

Основное приложение по распознаванию лиц представляет собой окно с изображением, получаемым от камеры, и дополнительной информацией. Программа производит поиск лица на каждом кадре видеопотока. При обнаружении лица создается его кодировка (как в генераторе кодировок). Данная кодировка сравнивается с имеющимися в файле «EncodeFile.p». Если кодировки сходятся, программа отправляет информацию в БД.

Решения каждого этапа позволяют повысить быстродействие и точность аутентификации. Оптимизация пропускной системы обеспечивает все вышеописанные преимущества.

1. Сайт Firebase [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://console.firebase.google.com>

2. Седюк, А. С., Журавлёва Е. Р. Автоматизация пропускной системы с помощью биометрической идентификации // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении [Электронный ресурс]: материалы XII международной научно-практической конференции (Минск, 13 марта 2024 г.). – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/142349>

## **ИММОБИЛАЙЗЕР – ЗАЩИТА, МЕШАЮЩАЯ УДОБСТВУ**

**Заярный В.П., Кляшторный А.А., Погуляев Т.М.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь.

С технической точки зрения, иммобилайзер — это электронный блок, интегрированный в бортовую сеть автомобиля, который разрывает одну или несколько критических цепей, необходимых для запуска и работы двигателя. Иммобилайзер действует скрытно и не имеет собственных исполнительных устройств, которые можно было бы легко заблокировать или отключить механически. Необходимость в иммобилайзере появилась после того, как статистика угонов 90-х годов показала: прямое соединение контактов замка занимает у злоумышленника менее минуты. Иммобилайзер решает эту проблему на уровне алгоритма или, как минимум, серьезно затрудняет процесс угона. При попытке запуска двигателя он проверяет правильность ключа, если ключ неизвестен системе иммобилайзера или отсутствует, то он через ЭБУ блокирует как минимум две независимые функции: управление форсунками и работу катушек зажигания. Физически двигатель может крутиться стартером, но топливовоздушная смесь не формируется и не воспламеняется. Угон становится невозможным без физического доступа к блоку управления и его перепрошивки или обхода.

Базовый принцип работы иммобилайзера основан на технологии RFID (Radio Frequency Identification).

Система включает три ключевых компонента:

1. Транспондер (метка). Пассивный элемент, встроенный в головку ключа зажигания. Содержит память с уникальным идентификатором (ID) и, в более сложных системах, криптографическим ключом. При этом у метки нет собственного источника питания.

2. Ридер (катушка-антенна). Установлен вокруг личинки замка зажигания и выполняет две функции: генерирует переменное электромагнитное поле для питания поднесенной метки и принимает ответный сигнал с данными.

3. Непосредственно блок управления иммобилайзером, интегрированный в ЭБУ или выполненный как отдельный модуль.

При включении зажигания блок иммобилайзера подает переменный сигнал на антенну, что вызывает явление ЭДС магнитной индукции в катушке ключа, полученная энергия подается на чип, он включается и передает зашитый в него код. В старых системах происходит простое сравнение ID с таблицей в памяти.

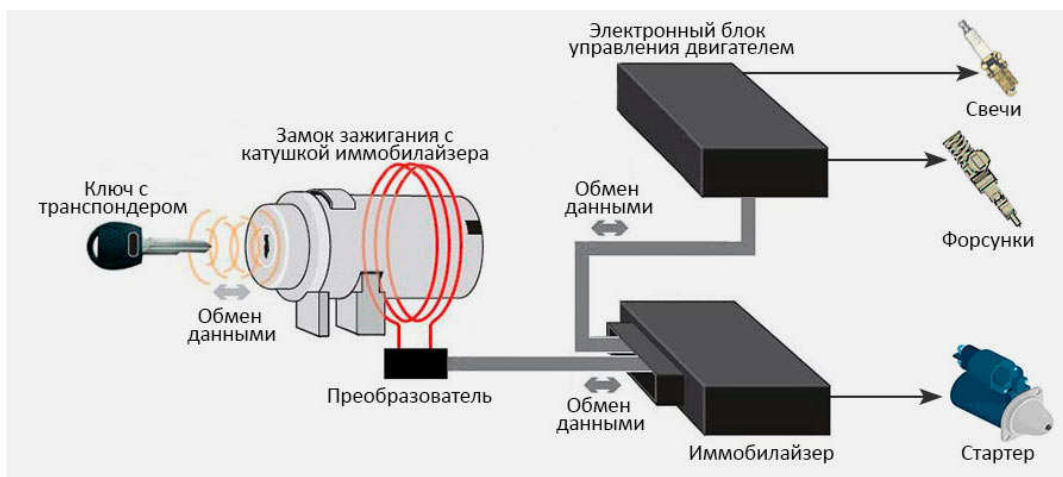


Рисунок 1 – Схема системы зажигания двигателя с идентификацией ключа

В современных системах используется принцип «рукопожатия». Блок управления отправляет ключу случайное число. Ключ преобразует его по секретному алгоритму и отправляет результат обратно. Блок делает то же самое вычисление и сравнивает итог. Если результаты совпадают, ключ признается «своим». Это исключает возможность перехвата и ретрансляции кода. После успешной аутентификации блок управления либо замыкает реле стартера, либо (чаще) отправляет по CAN-шине разрешающий сигнал в ЭБУ. Только после этого ЭБУ включает зажигание и подает импульсы на форсунки.

Несмотря на высокую надежность системы, существуют объективные технические причины, по которым владельцы прибегают к отключению или обману иммобилайзера.

Частые причины – сбой чтения ключа из-за деградации электронных компонентов либо утрата родных ключей от автомобиля. В первом случае со временем радиус чтения ключа сокращается с номинальных 5-10 см почти до нуля. Владелец сталкивается с ситуацией, когда стартер вращается, но ЭБУ не получает разрешения на впрыск топлива и генерацию искры. Диагностика показывает ошибки связи с иммобилайзером. Замена компонентов на старых автомобилях затруднена дефицитом оригинальных запчастей, кроме того, деактивация системы часто дешевле ремонта, что делает его не целесообразным. Еще более частая причина – конфликт с штатными системами автозапуска. Установка систем дистанционного пуска требует наличия модуля-обходчика иммобилайзера. Штатный иммобилайзер ожидает увидеть код ключа в момент старта, но автоматическом запуске ключ в замке отсутствует. Обходчик считывает код с запасного ключа, спрятанного в автомобиле и транслирует его в антенну. Однако, реализация данного метода может приводить к конфликтам на шине данных из-за чего иммобилайзер не увидит сигнал от обходчика. Существует схожий метод обмана иммобилайзера - путем инъекции команд для ЭБУ по CAN-шине. Для этого в разъем подключения к CAN-шине устанавливается устройство,

которое шлет в сеть автомобиля заранее известные (или подобранные) коды пакетов данных, которые имитируют разрешающие запуск сообщения от блока иммобилайзера. ЭБУ двигателя, получив такой пакет по CAN-шине, воспринимает его как команду от штатной системы и разблокирует запуск двигателя. Самый же надежный способ отключения иммобилайзера - прошить ЭБУ программой, не содержащей алгоритмов работы с иммобилайзером. В таком случае нет необходимости в использовании дополнительных устройств обхода или эмуляции иммобилайзера, однако данный вариант стоит дороже и требует проверенного специалиста по ремонту и перепрошивке автомобильных блоков управления.

Безусловно, иммобилайзер является важной частью противоугонной системы любого современного автомобиля, пусть и имеющей свои недостатки и пути для взлома. К сожалению многие автовладельцы предпочитают убрать эту систему после ее выхода из строя для исключения потенциальных проблем в будущем. Поэтому актуальным является вопрос того, как можно улучшить логику работы иммобилайзера, чтобы не вынуждать владельца обманывать ЭБУ при установке систем удаленного запуска двигателя, что особенно актуально в Беларуси - стране с холодными зимами, когда хочется, выйдя из дома утром, сесть в заранее прогретую машину. Т.к. все современные автомобили оснащаются электронными педалями газа, предлагаем не блокировать запуск двигателя в отсутствие ключа, а игнорировать нажатия педали газа и не выводить мотор из режима холостого хода. Если в автомобиле установлена автоматическая/роботизированная коробка переключения передач, то в дополнение не переключать ее в положения D и R при отсутствии ключа. Таким образом автовладелец сможет без каких-либо проблем устанавливать сторонний блок автозапуска, не удаляя одну из основных противоугонных систем своего транспортного средства. Кроме того, игнорирование педали газа и блокировка коробки переключения передач требуют более простых алгоритмов, нежели предложенный компанией «Рено» (патент RU 2668139 С2) алгоритм отслеживания роста крутящего момента с принудительной остановкой двигателя при значениях крутящего момента, отличных от холостого хода.

1. Что такое иммобилайзер и есть ли он в моей машине [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autonews.ru/news/62b1806e9a79479afbcf040e>. Дата доступа: 14.02.2026.

2. Иммобилайзер в автомобиле: что это, как работает, виды, установка, как отключить [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://card-oil.ru/immobilizer-v-avtomobile-chto-eto-kak-rabotaet-vidy-ustanovka/>. Дата доступа: 14.02.2026.

3. Патент № 2668139 С2 Российская Федерация, МПК В60R 25/00. Способ и система защищенного дистанционного запуска транспортного средства : № 2016136011 : заявл. 15.01.2015 : опубл. 26.09.2018 / Н. Монтель, Ж. Орбе, К. Тютнье [и др.]. – EDN TYNEEF.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ**

**Иванов А.И., Королёв А.Ю.**

Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Республика Беларусь

В работе выполнялись исследования влияния температуры электролита на твердость и коэффициент трения поверхности образцов после электролитно-плазменной нитроцементации (ЭПНЦ). Для экспериментов в качестве образцов использовались пластины из технически чистого титана VT1 размерами 10×20×1 мм. В качестве электролита был выбран водный раствор хлорида аммония (10 %), аммиака водного (5 %) и глицерина (10 %). В процессе экспериментов температура электролита устанавливалась равной 20, 30 и 40 °С. Заданный уровень температуры поддерживался системой охлаждения рабочей установки, включающей чиллер, теплообменник и барботер. Величина рабочего напряжения выбиралась таким образом, чтобы обеспечить нагрев образцов до температуры 900–950 °С. После окончания процесса ЭПНЦ образцы не извлекаясь из электролита охлаждались в нем.

Следует отметить, что после ЭПНЦ на поверхности обрабатываемых образцов формируется оксидный слой, а в их поверхностном слое формируется диффузионный слой, который состоит из двух выраженных зон – карбонитридного слоя и расположенного под ним упрочненного подслоя. По этой причине для оценки результатов нитроцементации оксидный слой предварительно удалялся с поверхности образцов.

Микротвердость поверхности измерялась при помощи микротвердомера AFFRI MVDM8. В качестве индентора использовалась алмазная пирамида, нагрузка составляла 200 г, а время под нагрузкой – 15 с. Исследование износостойкости поверхности выполнялось на трибометре FT-3 фрактологическим методом исследования дорожки износа. Для этого образец фиксировался в держателе трибометра таким образом, чтобы обеспечить его плотное и стабильное размещение в рабочей зоне. Контрольный образец (шар из нитрида кремния), контактирующий с тестируемым образцом, устанавливается на подвижной элемент устройства. Испытания проводились при следующих параметрах:

- нагрузка – 220 г;
- скорость прохода – 2900 мм/мин;
- длина дорожки – 6 мм;
- расстояние – 200 м.

В ходе испытаний регистрировались значения силы трения и изменения нагрузки, на основании которых определялся коэффициент трения. Результаты проведенных измерений представлены на рисунке 1.

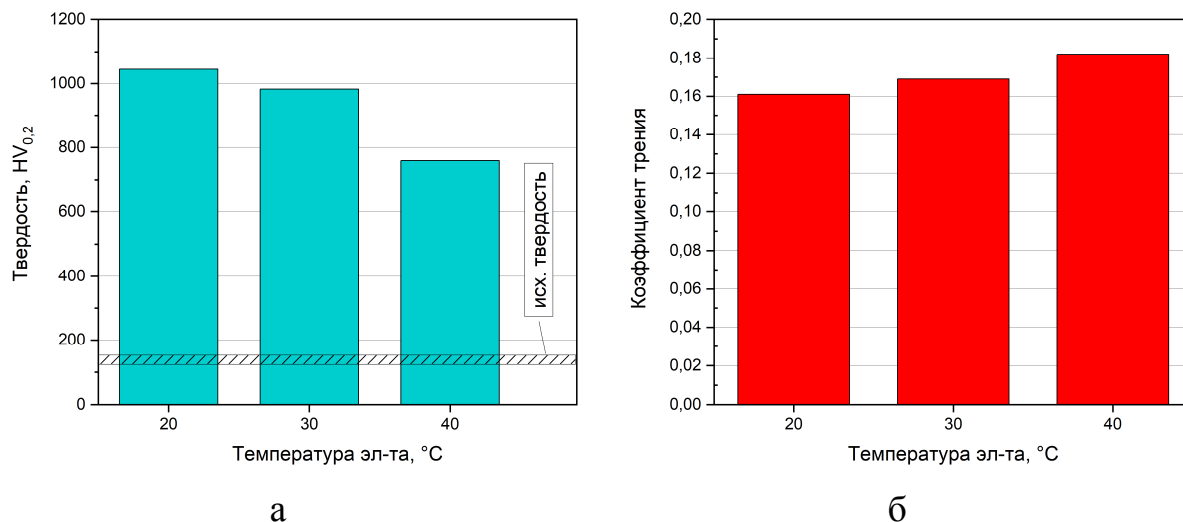


Рис. 1 – Твердость (а) и значение коэффициента трения (б) поверхности образцов после ЭПНЦ при различной температуре электролита

Было установлено, что после ЭПНЦ твердость поверхности существенно возрастает. Так, твердость упрочненной поверхности увеличивается в 5–7 раз по сравнению с исходным состоянием (с 140–165 HV до 759–1045 HV). Максимальные значения твердости зафиксированы при температуре электролита 20 °С, тогда как минимальные – при 40 (различие составляет 27 %). Обработка при 30 °С обеспечивает результаты, сопоставимые с упрочнением при 20 °С. В этом случае твердость достигает 982 HV, что лишь на 6 % ниже значения, получаемого при 20 °С. Схожие результаты получены при анализе изменения коэффициента трения. Проведение ЭПНЦ приводит к его снижению в 3–3,5 раза по сравнению с исходным значением. При температуре электролита 20 °С его значение равно 0,161, при 30 °С – 0,169, при 40 °С – 0,182. Разница между получаемыми значениями менее выражена по сравнению с изменением твердости поверхности и составляет 7,5 % между 20 и 40 °С и 5 % – между 20 и 30 °С.

Таким образом, по результатам анализа полученных данных можно сделать вывод, что оптимальная температура электролита для осуществления процесса ЭПНЦ находится в диапазоне 20–30 °С. Превышение указанного интервала температур приводит к снижению скорости и интенсивности диффузии атомов углерода и азота в поверхностные слои титана и, тем самым, снижает максимально достижимое значение твердости. Что касается коэффициента трения, температура электролита не оказывает столь выраженного влияния на его величину как в случае твердости. Тем не менее, при выходе за пределы температуры 20–30 °С достигаемые значения коэффициента трения оказываются несколько выше по сравнению с результатами, полученными в указанном интервале температур.

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

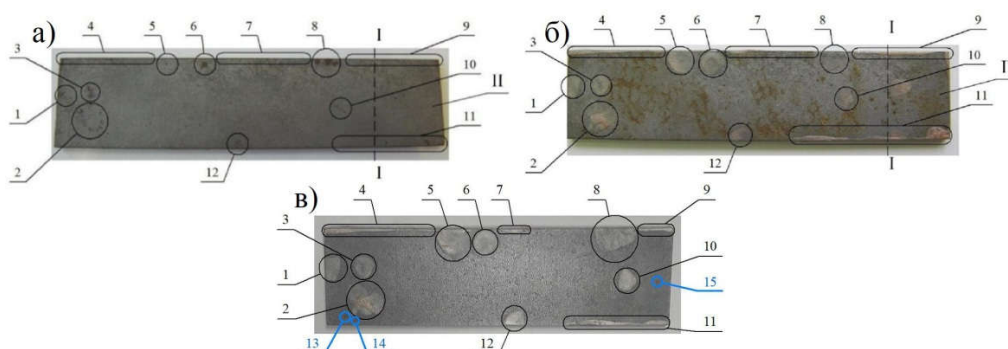
Качанов И.В., Жук А.Н., Ленкевич С.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Успешная реализация процесса лазерной резки в современном промышленном производстве зависит от качества очистки и защиты поверхности от коррозии.

Одним из основных технологических факторов влияющих на качество очистки и защиты поверхностей от коррозии является использование в составе рабочей суспензии бентонита, определенной концентрации.

Исследования на коррозионную стойкость стальных образцов с пленочным покрытием на основе бентонитовой глины, сформированным после РСО, проводились в соответствии с методикой [1,2]. Полное количество циклов для испытаний образца по такой методике составило 10.



а – фотография образца из стали Ст3пс в исходном состоянии перед проведением коррозионных испытаний; б – фотография образца из стали Ст3пс после проведения коррозионных испытаний; в – фотография образца из стали Ст3пс перед оценкой качества поверхности после промывки его в теплой воде ( $T_{\text{в}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с использованием моющего средства МЛ-51;  $K_{\text{б}} = 3,5 \%$ ;  $K_{\text{к.с.}} = 1,0 \%$ ;  $v_{\text{стр}} = 200 \text{ м/с}$ ;  $p_{\text{вых}} = 20 \text{ МПа}$ ;  $L = 30 \text{ мм}$ ;  $\lambda = 0,963$ ;  $d_{\text{с}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

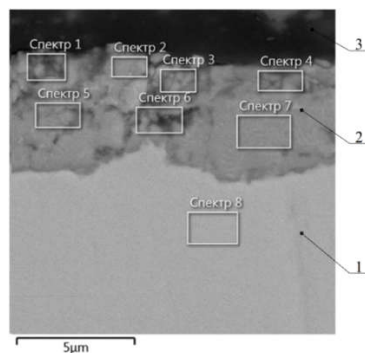
Рисунок 1 – Фотографии стальных образцов с пленочным покрытием на основе бентонитовой глины до (а) и после проведения коррозионных испытаний (б). Вид образца перед оценкой качества его поверхности после коррозионных испытаний и регламентированной последующей промывки в теплой воде при  $T_{\text{в}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (в)

В основу коррозионных испытаний положено выявление очагов коррозии на изучаемой поверхности в результате воздействия на последнюю агрессивной коррозионноактивной внешней среды (электролиты, солевые или кислотные туманы и т. д.). Для получения корректной базы данных по формированию новых очагов коррозии в процессе проведения коррозионных испытаний необходимо

предварительно удалить с изучаемой поверхности все имеющиеся поверхностные дефекты либо покрыть их и торцевые участки образца специальным защитным составом (лак, пушечное сало). На рисунке 1, а, б, в показана нумерация площадок 1–12, которые покрывались лаком МЛ-94 перед проведением коррозионных испытаний. Вертикальная линия I–I на рисунке 1, а, б характеризует положение сечения, по которому от основного образца отрезали участок II, использованный для изготовления шлифа поперечного сечения образца.

Определив суммарную длину отрезков  $n_A = 6$  мм, приходящихся на пятна поражения (разрушения) поверхности пленочного покрытия на площадках 13, 14, 15, а также установив сумму длин всех линий на поверхности образца  $n_A = 780$  мм, была установлена степень поражения поверхности пленочного покрытия в процентах  $X_A$ , равная 0,77 %. В соответствии с ГОСТ 9.305–85 величина  $X_A = 0,77$  % характеризует высокий показатель коррозионной стойкости пленочного покрытия в баллах, равный 9. Отмеченный факт формирования после РСО на очищенной поверхности покрытия с высокой коррозионной стойкостью имеет существенную значимость при подготовке стальных материалов под, например, лазерную резку, покраску, газоплазменное напыление либо при изготовлении деталей или конструкции с длительным межоперационным циклом (постройка корпуса судна на открытом воздухе может составлять 3–4 месяца, что требует решения вопроса по его коррозионной защите в указанном промежутке времени).

Для оценки изменений в составе пленочного покрытия, установления структуры и спектров рентгеновского излучения после проведения коррозионных испытаний использовались шлифы поперечного сечения образца (рисунок 2).



1 – основной металл (сталь Ст3пс); 2 – защитное пленочное покрытие на основе бентонитовой глины; 3 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола);

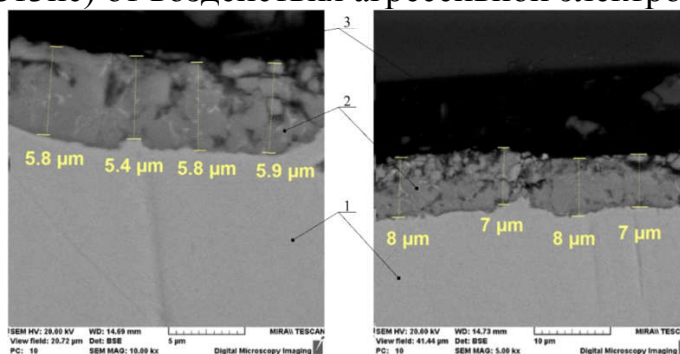
$p_{вх} = 20$  МПа;  $L = 30$  мм;  $d_c = 1,2$  мм;  $K_b = 3,5$  %;  $K_{к.с.} = 1,0$  %

Рисунок 2 – Участок поперечного сечения шлифа, используемого для анализа химического состава покрытия (спектры 1–7) и металла (спектр 8) после РСО и последующих испытаний образцов из стали Ст3пс на коррозионную стойкость

Из анализа рисунка 2 можно сделать вывод, что структура пленочного покрытия после коррозионных испытаний остается однородной по

сечению, при этом четко просматривается плотное прилегание покрытия на поверхности основы металла.

Из анализа рисунка 3 следует, что проведенные испытания на коррозионную стойкость подтвердили достаточно высокую эффективность сформированного пленочного покрытия по части защиты основного металла (сталь Ст3пс) от воздействия агрессивной электролитной среды.

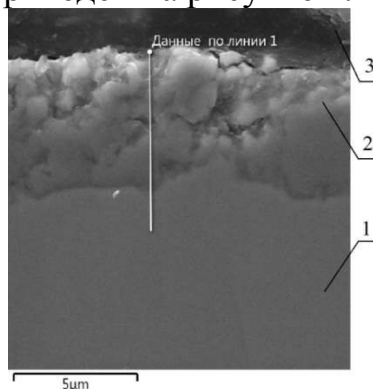


1 – основной металл (сталь Ст3пс); 2 – защитное пленочное покрытие на основе бентонитовой глины; 3 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола);

$$p_{\text{вх}} = 20 \text{ МПа}; L = 30 \text{ мм}; d_c = 1,2 \text{ мм}; K_6 = 3,5 \%; K_{\text{к.с.}} = 1,0 \%$$

Рисунок 3 – Участки поперечных сечений шлифов с максимальным (а) и минимальным (б) уносом массы пленочного покрытия после проведения коррозионных испытаний, прошедших предварительно РСО

Характер изменения концентрации указанных элементов О и Fe вдоль линии 1 по поперечному сечению шлифа, включая внедрение на 3–4 мкм в часть основы материала приведен на рисунке 4.



1 – основной металл (сталь Ст3пс); 2 – защитное пленочное покрытие на основе бентонитовой глины; 3 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола);

$$p_{\text{вх}} = 23 \text{ МПа}; L = 30 \text{ мм}; d_c = 1,2 \text{ мм}$$

Рисунок 4 – Поперечное сечение шлифа после РСО и коррозионных испытаний для анализа распределения элементов Fe и О вдоль линии 1

1. Жук, А.Н. Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхностей стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой: дис. канд. техн. наук : 05.02.07 / А.Н. Жук. – Минск, 2022. – 201 л.

2. Способ очистки металлических поверхностей : пат. ВУ 21512 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко. – Оpubл. 30.12.2017.

## **СТРУКТУРА И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

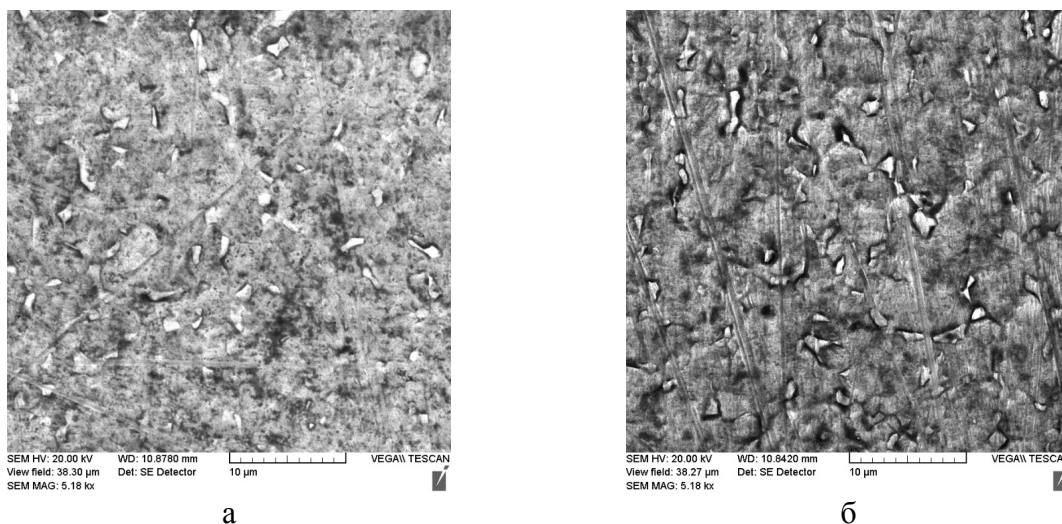
**Королёв А.Ю., Нисс В.С.**

РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,  
г. Минск, Беларусь

В качестве альтернативы существующим методам повышения качества поверхности титана и его сплавов применяется электролитно-плазменная обработка (ЭПО). На основе ЭПО разработан и внедрен в производство ряд новых высокоэффективных процессов, обеспечивающих повышение качества поверхности изделий, изготавливаемых из широкого. При этом процессы ЭПО материалов на основе титана до настоящего времени мало изучены. Но тем не менее, проведенные исследования показали высокую эффективность использования метода при производстве изделий из них.

Титан и его сплавы являются сложными с точки зрения обрабатываемости методом ЭПО материалами. Их способность к окислению и формированию стойкой оксидной пленки существенно ограничивает возможность качественной обработки с формированием блестящей полированной поверхности. Качественная обработка возможна только в узком диапазоне параметров ЭПО, отклонение от которых приводит к возникновению дефектов на поверхности или формированию вместо полированной поверхности оксидного слоя.

В результате выполненных исследований установлено, что при ЭПО сплава ВТ6 на поверхности формируется структура, характерная для металлографического травления, с выделением отдельных фазовых составляющих. В сплаве ВТ6  $\alpha$ -фаза обладает большей электрохимической активностью по сравнению с  $\beta$ -фазой. В результате участки, соответствующие  $\alpha$ -фазе обрабатываются более интенсивно, а на поверхности формируется характерный рельеф, вызванный их преимущественным растворением. С ростом продолжительности ЭПО из-за преимущественного растворения  $\alpha$ -фазы рельефность поверхности увеличивается. На рис. 1 представлены фотографии образцов из сплава ВТ6 после ЭПО при температуре электролита 80 °С с продолжительностью 3 и 7,5 мин. В результате ЭПО продолжительностью 3 мин наблюдается четкое выделение отдельных составляющих сплава (рис. 1а), при этом зерна  $\beta$ -фазы выступают над поверхностью. При увеличении продолжительности ЭПО до 7,5 мин (рис. 1б) преимущественное анодное растворение  $\alpha$ -фазы приводит к образованию канавок вдоль границ зерен  $\beta$ -фазы.



а – 3 мин; б – 7,5 мин

Рис. 1. Изменение структуры поверхности сплава ВТ6, вызванного различной скоростью растворения структурных составляющих при ЭПО

На рис. 2 представлены зависимости, характеризующие динамику изменения шероховатости поверхности образцов из сплава ВТ6 в результате ЭПО при температуре электролита 80 и 90 °С. После обработки продолжительностью 3–5 мин величина  $\Delta Ra$  составляет: 0,158–0,173 мкм при температуре 80 °С и 0,132–0,161 мкм при 90 °С. Дальнейшая обработка при температуре 80 °С приводит к снижению качества формируемой поверхности из-за преимущественного анодного растворения участков, соответствующих  $\alpha$ -фазе. Таким образом предельная величина изменения шероховатости при 80 °С достигается в результате обработки продолжительностью 5 мин. Из-за меньшего съема при 90 °С предельное значение  $\Delta Ra$  наблюдается только после обработки продолжительностью 7,5 мин, после чего происходит снижение качества поверхности. Полученные результаты являются основой для разработки процессов повышения качества поверхности изделий медицинского и машиностроительного назначения из титана и титановых сплавов.

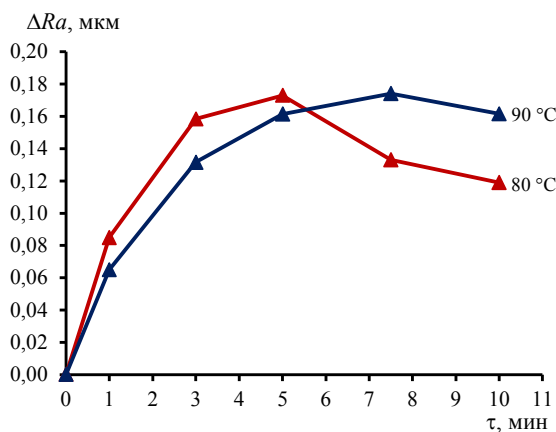


Рис. 2 – Динамика изменения шероховатости поверхности образцов из сплава ВТ6 при ЭПО

## **ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ТОРГОВОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

**Кравец Д.Т.<sup>1</sup>, Прохорович С. С.<sup>1</sup>, Мальцев В. Л.<sup>1</sup>, Гриневич А. И.<sup>1</sup>**

1). УО «Национальный Детский Технопарк», Минск, Республика Беларусь

2). Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Современное развитие логистики и складского хозяйства неразрывно связано с процессами цифровизации и автоматизации. Одним из наиболее трудоемких процессов на складах остается инвентаризация товаров, которая в традиционном виде требует значительных временных затрат и подвержена влиянию человеческого фактора. Внедрение автономных мобильных роботов (AMR) позволяет перейти на принципиально новый уровень контроля, обеспечивая автоматический объезд территории, фиксацию наличия продукции и интеграцию данных в системы управления складом (WMS).

Мировой рынок складской робототехники демонстрирует стабильный рост: по прогнозам, к 2030 году его объем может достичь 45 миллиардов долларов США. В рамках данного исследования была разработана функциональная модель мобильного робота-инвентаризатора, предназначенного для автономного сбора данных о товарах с использованием визуальных меток (QR и DataMatrix кодов).

**Проектирование и конструкция** Процесс создания робота начался с этапа 3D-моделирования в среде SolidWorks. Это позволило оптимизировать внутреннюю компоновку модулей, проверить проходимость платформы в узких складских проходах (шириной до 45 см) и подготовить детали для 3D-печати.

Основой конструкции послужила каркасная система на базе алюминиевого профиля 40×40 мм. Выбор данного материала обусловлен его высокой прочностью, устойчивостью к вибрациям и модульностью, что позволяет легко модифицировать робота под конкретные задачи. Тяжелые компоненты, такие как аккумуляторы и мотор-редукторы, были размещены в нижней части рамы для снижения центра тяжести и обеспечения устойчивости при движении по неровным поверхностям.

**Электронная система управления** В проекте реализована распределенная двухуровневая архитектура управления, разделяющая задачи обработки данных и физического перемещения:

**Верхний уровень (Raspberry Pi 4):** выступает в роли «мозга» системы. Отвечает за захват видеопотока с камеры Raspberry Pi Camera

Module v2, распознавание кодов, работу с локальной базой данных SQLite и планирование маршрута.

**Низкий уровень (Arduino Uno):** выполняет функции исполнительного модуля. Управляет драйвером L298N и двумя мотор-редукторами GM25-370, а также обрабатывает сигналы с датчиков препятствий (HC-SR04) и гироскопа (MPU6050) в режиме реального времени.

Связь между модулями осуществляется через последовательный интерфейс USB. Питание системы реализовано от Li-Ion аккумулятора (11.1 В) с использованием понижающих DC-DC преобразователей для стабилизации напряжения питания микрокомпьютера.

**Программное обеспечение и техническое зрение** Программный комплекс робота написан на языках Python (для Raspberry Pi) и C++ (для Arduino). Система технического зрения базируется на библиотеке OpenCV. Для декодирования идентификационных меток используются специализированные библиотеки: pyzbar для QR-кодов и pylibdmtx для DataMatrix.

Алгоритм работы включает:

Потоковый захват изображения и поиск визуальных меток.

Декодирование информации и автоматическую запись в базу данных с указанием временной метки сканирования.

Передачу управляющих команд на платформу Arduino для корректировки движения. Для оператора предусмотрен графический интерфейс на базе библиотеки tkinter, позволяющий просматривать историю сканирований и экспортировать данные для анализа.

**Заключение** Разработанный прототип мобильного робота-инвентаризатора подтвердил эффективность применения систем технического зрения для автоматизации складского учета. Использование открытых платформ (Raspberry Pi, Arduino) и модульной конструкции из алюминиевого профиля делает систему масштабируемой и доступной для внедрения в логистических центрах торгового сектора. Дальнейшее развитие проекта предполагает внедрение алгоритмов SLAM для более точной навигации в пространстве без использования внешних ориентиров.

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техно-сфера, 2019. – 1104 с..

2. Бромбах, Л. Практическая робототехника. C++ и Raspberry Pi / Л. Бромбах. – СПб.: БХВ-Петербург, 2023. – 448 с..

## МЕТОД НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ НА БАЗЕ ОБОБЩЕННОГО РЕГУЛЯТОРА

Кулаков А.Т.<sup>1</sup>, Кулаков Г.Т.<sup>1</sup>, Ковалев В.А.<sup>2</sup>

1). Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

2). Белорусский государственный аграрный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

В отечественной практике для регулирования многих тепловых процессов, в частности температуры перегретого пара энергетических паровых котлов, начиная с 40-х годов прошлого века, типовыми являются двухконтурные системы автоматического регулирования с дифференцированием промежуточной регулируемой величины (САРД).

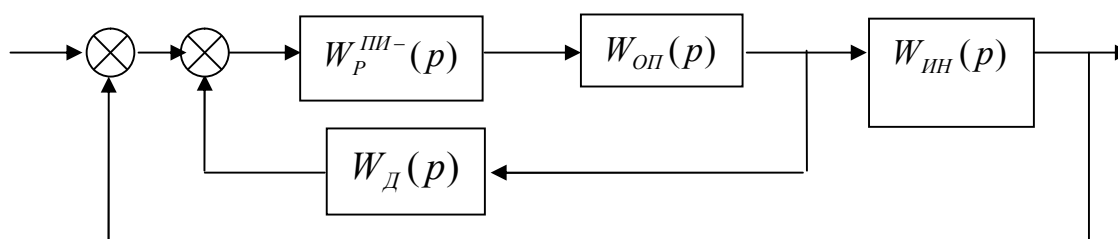


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы регулирования с дифференциатором

Штатный регулятор  $W_P^{III-}(p)$  САРД представляет собой ПИ-регулятор с взаимозависимыми параметрами настройки:

$$W_P^{III-}(p) = \frac{K_P(T_I p + 1)}{T_I p}. \quad (1)$$

Передаточная функция дифференциатора представлена реальным дифференцирующим звеном:

$$W_{д}(p) = \frac{K_{д} T_{д} p}{T_{д} p + 1}. \quad (2)$$

Одна из первых работ по настройке систем регулирования с дифференциатором датируется 1948 годом [1].

Методы настройки САРД подробно изложены в известных монографиях Ротача В.Я. [2,3,4]. К настоящему времени наибольшее распространение получили метод многоуровневого сканирования [4] и метод на основе генетических алгоритмов [5] которые являются поисковыми и требуют специального программного обеспечения.

В предлагаемой работе представлен аналитический метод настройки системы регулирования с дифференциатором на базе обобщенного регулятора.

Передаточные функции модели объекта регулирования:

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{T_{оп}p + 1} \text{ - опережающего участка;} \quad (3)$$

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин}e^{-\tau}}{T_{ин}p + 1} \text{ - инерционного участка.} \quad (4)$$

Часть структурной схемы, включающую регулятор  $W_p^{III-}(p)$ , модель опережающего участка  $W_{оп}(p)$  и дифференциатор  $W_d(p)$  можно рассматривать как обобщенный регулятор теперь уже одноконтурной системы регулирования, для которой объектом регулирования является модель инерционного участка  $W_{ин}(p)$ .

Выполним расчет настроек ПИ-регулятора (1) с использованием передаточной функции оптимального регулятора [6] по заданной передаточной функции замкнутой системы вида:

$$W_{зд}(p) = \frac{1}{T_{зд}p + 1} \quad (5)$$

по модели (3) опережающего участка по следующим формулам:

$$T_{и} = T_{оп}; \quad (6)$$

$$K_p = \frac{T_{оп}}{K_{оп}T_{зд}}. \quad (7)$$

где  $T_{зд} = \lambda T_{оп}$ . Значение коэффициента  $\lambda$  выбирается из диапазона  $0 < \lambda < 1$ .

Тогда передаточная функция обобщенного регулятора  $W_p^{OB}(p)$  принимает следующий вид:

$$W_p^{OB}(p) = \frac{W_p^{III-}(p)W_{оп}(p)}{1 + W_p^{III-}(p)W_{оп}(p)W_d(p)} = \frac{K_p^{OB}(T_{и}^{OB}p + 1)}{T_{и}^{OB}} * \frac{1}{T_{\phi}^{OB}p + 1}, \quad (8)$$

$$\text{где } K_p^{OB} = \frac{T_d}{T_{зд} + K_d T_d}, \quad (9)$$

$$T_{и}^{OB} = T_d, \quad (10)$$

$$T_{\phi}^{OB} = \frac{T_{зд}T_d}{T_{зд} + K_d T_d}. \quad (11)$$

Из формул (9) – (10) получим следующие искомые формулы взаимосвязи параметров настройки дифференциатора и обобщенного регулятора:

$$T_d = T_{и}^{OB}; \quad (12)$$

$$K_d = \frac{T_d - K_p^{OB}T_{зд}}{K_p^{OB}T_d} = \frac{1}{K_p^{OB}} - \frac{T_{зд}}{T_{и}^{OB}}. \quad (13)$$

Для настройки обобщенного ПИ-регулятора с фильтром (8) предложен следующий метод.

Настроим стабилизирующий ПИ-регулятор  $W_{CT}(p)$  внутреннего контура двухконтурной каскадной системы регулирования (КСАР), по тому же методу, как и ПИ-регулятор системы с дифференциатором по модели опережающего участка.

Поскольку передаточная функция настроенного внутреннего контура будет инерционным звеном первого порядка (5) то, приняв  $W_{\phi}^{OB}(p) = W_{3д}(p)$ , каскадная система регулирования, становится эквивалентной одноконтурной системе с обобщенным регулятором, где регулятор и объект представлены следующими передаточными функциями соответственно:

$$- W_P^{OB}(p) = \frac{K_P^{OB} (T_I^{OB} p + 1)}{T_I^{OB}} * \frac{1}{T_{3д1} p + 1}; \quad - W_O(p) = W_{инн}(p) = \frac{K_{инн} e^{-\varphi}}{T_{инн} p + 1}.$$

Обобщенный регулятор настроим методом модального оптимума [7] модифицированным для объектов с запаздыванием по передаточной функции расчетной модели объекта вида:

$$W_O^{PACЧ}(p) = W_{\phi}^{OB}(p) W_{инн}(p) = \frac{1}{T_{3д1} p + 1} * \frac{K_{инн} e^{-\varphi}}{T_{инн} p + 1} \approx \frac{K_{инн}}{(T_1 p + 1)(\delta p + 1)}, \quad (14)$$

$$\text{где } T_1 = T_{инн}, \quad \delta = T_{3д1} + \tau$$

по следующим формулам:

$$T_I^{OB} = T_1 = T_{инн}; \quad (15)$$

$$K_P^{OB} = \frac{T_1}{2K_{инн} * \delta} = \frac{T_{инн}}{2K_{инн}(T_{3д1} + \tau)}. \quad (16)$$

Тогда искомые формулы расчета настроек дифференциатора (12) и (13) с учетом формул (15) и (16) принимаю следующий вид:

$$T_D = T_I^{OB} = T_{инн}; \quad (17)$$

$$K_D = \frac{1}{K_P^{OB}} - \frac{T_{3д}}{T_I^{OB}} = \frac{2K_{инн}(T_{3д1} + \tau) - T_{3д}}{T_{инн}}. \quad (18)$$

На рисунке 2 показаны графики переходных процессов при отработке задающего воздействия в одноконтурной системе с обобщенным регулятором, САРД и КСАР при следующих параметрах модели объекта

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{T_{оп} p + 1} = \frac{2}{17.3 p + 1}; \quad W_{инн}(p) = \frac{K_{инн} e^{-\varphi}}{T_{инн} p + 1} = \frac{1.29 e^{-25p}}{84 p + 1}.$$

Значения параметров настройки систем регулирования при значении заданной постоянной времени  $T_{3д} = \lambda T_{оп} = 0.5 * 17.3 = 8.65$ :

- система с обобщенным регулятором -  $T_I^{OB} = 84$ ,  $K_P^{OB} = 0.968$ ,  $T_{\phi}^{OB} = 8.65$ ;

- САРД -  $T_I = 17.3$ ,  $K_P = 1.0$ ,  $T_D = 84$ ,  $K_D = 0.93$ ;

- КСАР -  $T_I^{CT} = 17.3$ ,  $K_P^{CT} = 1.0$ ,  $T_I^{KOP} = 84$ ,  $K_P^{KOP} = 0.968$ .

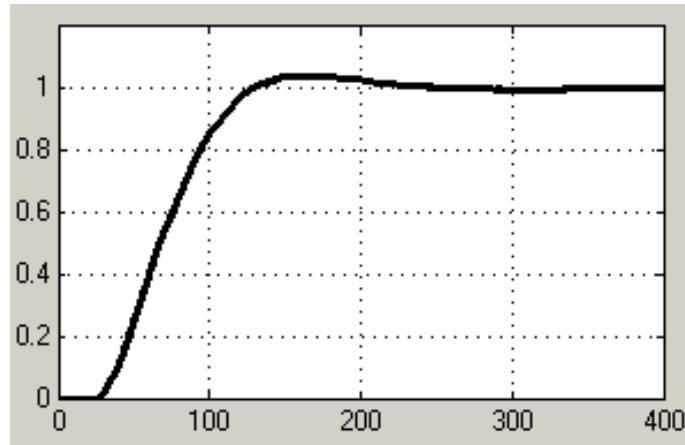


Рис.2. Графики переходных процессов при обработке единичного ступенчатого задающего воздействия

Графики переходных процессов при обработке задающего воздействия во всех трех системах регулирования практически совпадают.

Предложенный метод настройки системы регулирования с дифференциатором не требует специального программного обеспечения и проверочного моделирования переходных процессов по результатам настройки, поскольку базируется на модификации известного метода модального оптимума.

1. Миронов В.Д. Регулирование с опережающим импульсом. – «Известия ВТИ», 1948, №8
2. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. – М.: Госэнергоиздат, 1961.- 344с.
3. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования.- М.: Энергия, 1973.- 270с.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.- 396с.
5. Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И. Оптимизация настроек автоматических систем регулирования с дифференциатором. Сборник трудов конференции Control 2003. – М.: Издательство МЭИ, 2003. –С.159-165.
6. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие/ Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.
7. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования; пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 192с.

## СИНТЕЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

**Кулаков Г.Т., Воюш Н.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В практике автоматизация прямооточных котлов регулирование температуры перегретого пара осуществляется двухконтурной САР с дифференцированием промежуточной регулируемой величины (рис. 1, а).

Исходные данные по динамике пароперегревателя котла 67-СП 230/100 приведены в [1]. Передаточная функция опережающего участка объекта относительно регулирующего воздействия:

$$W_{оп}(s) = \frac{k_{оп}}{T_{оп}s+1} = \frac{3,1}{30s+1} \frac{ч \cdot град}{т}, \quad (1)$$

где входная величина – изменение расхода питательной воды на впрыск, т/ч; выходная величина – изменение температуры перегретого пара за местом впрыска, град. Передаточная функция главного участка:

$$W_{гл}(s) = \frac{k_{гл}}{(T_{гл}s+1)(\sigma_{гл}s+1)^2} = \frac{3,2}{(45s+1)(30s+1)^2} \frac{ч \cdot град}{т}, \quad (2)$$

где входная величина – изменение расхода питательной воды на впрыск, т/ч; выходная величина – изменение температуры перегретого пара за котлом, град; численные значения постоянных времени указаны в секундах.

Цель синтеза: модернизировать типовую САР с дифференциатором в каскадную систему, обеспечивающую отработку скачка задания в семь раз быстрее типовой САР без перерегулирования, достижения полной инвариантности относительно наиболее опасного внутреннего возмущения и повышения быстродействия при отработке крайнего внешнего возмущения, а также двухкратного уменьшения интеграла от модуля ошибки регулирования.

Схема моделирования переходных процессов такой инвариантной САР приведена на рисунке 1б.

Стабилизирующий ПИ-регулятор (рис. 1б) настраиваем по методике, приведенной в [2]: время интегрирования регулятора полностью компенсирует постоянную времени опережающего участка объекта (1):  $T_{ин}=T_{оп}=30с$ , а коэффициент передачи  $k_p=1/k_{оп}=0,32$ . Между выходом корректирующего регулятора (КР) и входом стабилизирующего регулятора (СР) устанавливаем усилитель  $k_{оп}=3,1$ . В результате чего внутренний контур со СР превращается в единичный усилитель. Это позволяет структуру и настройки КР выбирать только по передаточной функции главного участка объекта по формуле [2]:



сравнению с типовой САР. При этом степень затухания переходного процесса ТСАР составляет  $\psi=0,84$ .

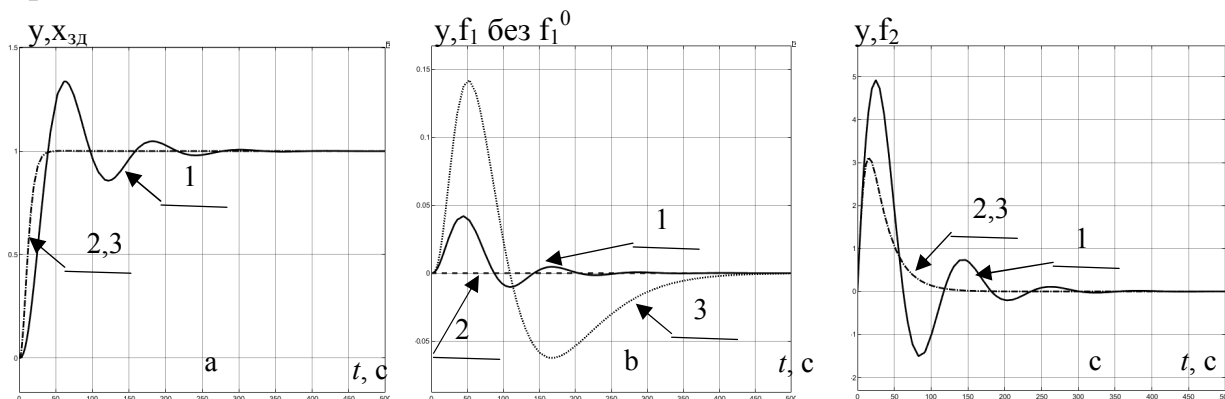


Рисунок 2 – Графики переходных процессов сравнивающих САР при отработке скачка задания (а), внутренних возмущений (б) и внешних возмущений (с)

На рисунке 2б время отработки внутреннего возмущения типовой САР (кривая 1) составляет 200с. Это в два раза меньше, чем у КСАР без дифференциатора инвариантности (кривая 3). При этом инвариантная КСАР обеспечивает полную инвариантность (прямая 2) по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению.

График отработки внешнего возмущения сравниваемых САР приведен на рисунке 2с. Видно, что ИКСАР сокращает время регулирования в 2,5 раза без колебаний. При этом модуль интеграла ошибки регулирования уменьшается в 2,2 раза.

Таким образом цель синтеза высококачественной САР впрыска достигнута.

#### Выводы:

1. Для повышения качества регулирования типовую САР с дифференциатором заменяем на каскадную САР.
2. Внутренний контур со стабилизирующим регулятором ( $T_{ин}=T_{оп}$ ;  $k_p=1/k_{оп}$ ) превращаем в единичный усилитель.
3. Структуру и параметры динамической настройки корректирующего регулятора выбираем по передаточной функции оптимального регулятора с использованием передаточной функции главного участка объекта.

1. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования / В. Я. Ротач. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 344 с.

2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238с.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ СИНТЕЗА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

**Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Основной проблемой современных систем автоматического управления (САУ) тепловых электрических станций (ТЭС) является обеспечение высокого качества их функционирования в широком диапазоне изменения нагрузок. Для решения многих современных проблем автоматизации технологических процессов разработаны основы теории экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем в рамках соответствующей научной школы, позволяющей существенно улучшить качество регулирования технологических процессов и служащей основой внедрения базисных инноваций в области автоматизации теплоэнергетическими процессами ТЭС [1÷6]. При этом вместо типовых алгоритмов регулирования, не позволяющих существенно улучшить качество регулирования из-за несоответствия в большинстве случаев структуры регулятора структуре математического описания динамики объекта более высокого порядка, используются оптимальные регуляторы. Математическая модель оптимального регулятора представляет собой произведение обратной передаточной функции объекта на заданную передаточную функцию разомкнутой системы, в которую входит критерий оптимальности в виде передаточной функции замкнутой системы по задающему воздействию с единственным расчетным параметром оптимальной динамической настройки, гарантирующим прямые показатели качества переходных процессов лучше зарубежных аналогов.

Системный анализ функционирования САУ технологическими процессами ТЭС указывает на необходимость их существенной модернизации. Это обусловлено вводом в эксплуатацию двух энергоблоков БЕЛАЭС, которые работают в базовой части графика электрической нагрузки. В связи с этим часть энергетического оборудования ТЭС ГПО «Белэнерго» вынуждены работать в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов в пиковой и полупиковой части графика электрических нагрузок. В этих условиях для повышения безопасности, надежности, долговечности и уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду и снижения себестоимости производства электрической и тепловой энергии необходимо внедрять инновационно-прорывные технологии автоматизации технологических процессов как на уровне низовой автоматики котлов и турбин, так и энергоблоков, общестанционной части САУ мощности станций в целом, а

также центральной управляющей вычислительной машины энергосистемы на основе аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем, позволяющих существенно улучшить качество регулирования при плановых и внеплановых изменениях нагрузки.

Модернизация основных систем автоматического регулирования только четырёх энергоблоков Лукомльской ГРЭС, включая системы автоматического управления мощностью блоков, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок от 100 до 30% номинальной мощности, позволит получить среднегодовой экономический эффект 1,45 млн. долларов США [1].

Для выполнения качественного регулирования необходимы знания о динамике объекта управления, т.е. идентификация объектов, которая проводится чаще всего экспериментальным путём. Для определения параметров динамических объектов целесообразно использовать их переходные характеристики, так как эти способы менее трудоёмкие, но позволяют получить достаточно полный объем информации для проведения структурно-параметрической оптимизации САР. Особенность предложенных экспресс-методов определения параметров математических моделей объектов регулирования с запаздыванием состоит в выделении из переходных характеристики той её части, которая аппроксимируется передаточной функцией инерционного звена второго порядка с различными постоянными времени. Оставшуюся часть графика переходной характеристики объекта предложено назвать условным запаздыванием объекта по каналу регулирующего воздействия [2]. При этом передаточная функция объекта в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием предложено использовать для исследования переходных процессов САР или рассчитывать параметры динамической настройки ПИД-регуляторов по методу полной компенсации в частном виде (МПК в ЧВ) [2]. Для расчёта параметров динамической настройки ПИ-регуляторов по методу МПК в ЧВ предложено использовать расчётную передаточную функцию объекта в виде инерционного звена первого порядка с условным запаздыванием, время разгона которого равна сумме постоянных времени знаменателя передаточной функции второго порядка без условного запаздывания, кроме того эту упрощенную модель объекта рекомендовано использовать для выбора структуры типового регулятора и расчёта параметров его динамической настройки по методу полной компенсации в общем виде (МПК в ОВ) [3, 5].

Особенностью методов полной компенсации является то, что они используются для оптимальной отработки задающих сигналов и крайних внешних возмущений, а для отработки внутренних возмущений разработаны методы частичной компенсации (МЧК) [2] и

модифицированный метод частичной динамика которых компенсации (ММЧК) [4].

Следует отметить, что МПК в ЧВ для объектов, динамика которых описывается инерционным звеном второго порядка с различными постоянными времени, в качестве критерия оптимальной отработки задания имеет минимум интеграла от суммы квадратов ошибки и её производной, а также соответствует критерию оптимального модуля и передаточной функции колебательного звена с коэффициентом

$$\frac{1}{\sqrt{2}}$$

демпфирования, равным  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Последнее позволяет определять прямые показатели качества по численному значению малой постоянной времени  $\sigma$ :  $t_p=8,4\sigma$  – полное время регулирования;  $t_{p1}=4,7\sigma$  – время первого достижения скачка задания;  $\Delta\sigma_m=4,3\%$  – максимальная величина перерегулирования [2].

Для объектов регулирования с условным запаздыванием  $\tau_y$  используют формулы МПК в ЧВ с заменой малой постоянной времени передаточной функции объекта  $\sigma$  на условное запаздывание  $\tau_y$ .

В двухконтурных типовых САР для расчёта параметров динамической настройки стабилизирующих ПИ-регуляторов используют методы МЧК или ММЧК, а корректирующие регуляторы настраивают по методам МПК.

Для повышения качества регулирования типовых каскадных САР с малоинерционными датчиками предложено стабилизирующий регулятор настраивать по передаточной функции оптимального регулятора, а корректирующий регулятор – по МПК в ЧВ для двух значений

коэффициента демпфирования  $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$  и  $\xi = 1$  колебательного звена.

Для существенного улучшения качества регулирования САР с дифференцированием промежуточной регулируемой величины рекомендовано использовать инвариантную САР с косвенным выделением внешнего возмущения без его измерения, в том числе с использованием стабилизирующего устройства [4].

Для выделения эквивалентного внешнего возмущения параллельно инерционному участку объекта регулирования реализуют его полную модель в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием, на вход которого подают сигнал по промежуточной регулируемой величине, а выход с минусом подают на вход дополнительного элемента сравнения, на второй вход которого подают сигнал с плюсом основной регулируемой величины. При этом выходной сигнал дополнительного элемента сравнения поступает на вход дифференциатора компенсации эквивалентного внешнего возмущения, выход которого с минусом подают на вход основного регулятора [2].

Для достижения полной инвариантности по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению предложено его измерять и компенсировать дополнительным дифференциатором [4]. Причём

передаточная функция этого дифференциатора равна обратной передаточной функции основного регулятора.

Доказано существенное повышение качества регулирования ИСАР по СУ по сравнению с ИСАР с дифференциатором как для скачкообразных, так и трапециевидных внешних возмущений [4].

Максимальное повышение качества регулирования достигается использованием дважды инвариантной САР при плановом изменении нагрузки [4]. При этом инвариантная САР при плановом изменении нагрузки, кроме полной инвариантности, по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению, позволяет достигнуть требуемого качества отработки крайнего внешнего возмущения с точностью до заданного значения

Для сохранения высокого качества регулирования во всем диапазоне изменения нагрузок предложено автоматически корректировать параметры регулирующих устройств и моделей в функции изменения расхода перегретого пара на входе котла или электрической мощности энергоблока.

Аналитические экспресс-методы синтеза высококачественных систем автоматического управления технологическими процессами прошли широкую апробацию при модернизации регуляторов впрыска котла ТГМП-114 энергоблока №1 Лукомльской ГРЭС, работающего в широком диапазоне изменения нагрузок котла от 100 до 30%, позволяя получить практически любые показатели качества регулирования при основных воздействиях.

1. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Высшая школа, 2017. – 238 с.

2. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: спр. пособие / Г.Т. Кулаков. – Минск: Высшейш. шк., 1984. – 192 с.

3. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г.Т. Кулаков. – Минск: Технопринт, 2003. – 135 с.

4. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Высшая школа, 2022. – 197с.

5. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.

6. Кулаков, Г. Т. Феномен золотого сечения как основа экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении [Электронный ресурс] : материалы XI международной научно-практической конференции (Минск, 5 апреля 2023 года) : в рамках выставки «Автоматизация, электроника – 2023» / редкол.: А. Р. Околов (гл. ред.) [и др.] ; сост. А. Н. Дербан. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 74-78.

## **ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ**

**Лобатый А.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Существуют классы управляемых технических систем (объектов), для которых отказ или потеря работоспособности отдельных элементов приводит не только к снижению эффективности применения, но и к безвозвратной потере всей системы (объекта). Это имеет место в космических и авиационных областях. К таким системам относятся, в том числе беспилотные летательные аппараты (БЛА). При применении таких систем необходимо решать задачу обеспечения их надёжности в процессе функционирования. Повышение надёжности конструкции, как правило, связано с усложнением и увеличением стоимости эксплуатируемой системы. В то же время при оценивании надёжности в процессе управления БЛА можно выбрать такой режим работы, при котором система будет способна выполнять своё основное предназначение.

Одним из путей решения такой задачи является применение в системе (на борту БЛА) элементов «искусственного интеллекта» на основе нейросетевых технологий, реализованных в цифровой форме. Однако для того, чтобы нейросеть успешно решала задачу оценки технического состояния и выработывала рекомендации по управлению, необходимо данную нейросеть соответствующим образом настраивать – «обучать», для чего требуется не всегда доступный объём исходной информации в виде «обучающих выборок», которые должны предусматривать все возможные варианты изменения параметров системы в процессе её функционирования в любых условиях. В то же время параметры, характеризующие техническое состояние БЛА, подчиняются известным законам физики и имеют свои апробированные математические модели. Измерение этих параметров производится датчиками, для которых также имеются свои математические модели.

В общем случае процессы, характеризующие состояние системы, являются случайными и описываются стохастическими векторными уравнениями в форме Ланжевена или Ито. Эволюция таких процессов подчиняется уравнению Стратоновича-Кушнера для апостериорной функции плотности вероятности, для которого разработаны различные формы представления и «обобщения», учитывающие разные постановки задачи исследований. На основе данного уравнения получаются алгоритмы оптимальной обработки информации, получаемой на основе измерений параметров с помощью датчиков, позволяющие выработать рекомендации по выбору рациональных режимов управления системой.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА INOVANCE НА ОСНОВЕ ДАННЫХ САМ-СИСТЕМЫ SPRUTCAM**

**Марченко И.С., Германович А.П., Данильчик А.А.**  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В связи со стремительным увеличением номенклатуры роботоманипуляторов, производимых различными компаниями, а также периодическим обновлением синтаксиса кода у производителей, возникает острый вопрос интеграции САМ-систем с промышленными роботами. В условиях цифрового производства возможность преобразования траекторий, сформированных в системе офлайн-программирования, в формат, совместимый с конкретным промышленным контроллером, имеет особое значение и напрямую влияет на затраты времени для разработки и корректировки нового технологического процесса. Примером распространенной САМ-системы является программный пакет SprutCAM [1], который формирует управляющие программы в текстовом формате, содержащем последовательность команд описания движения, режимов подачи, выбора инструмента и вспомогательных операций. В роботизированном модуле система использует команды типа FROM, PHYSICGOTO, MULTIGOTO, MULTIARC и другие. В отличие от станочных G-кодов, траектория робота может описываться как в декартовых, так и в осевых параметрах (A1-A6), причем значения относительных углов наклона звеньев записываются в строке движения. Также в тексте программы встречаются служебные блоки структуры, что усложняет прямую трансляцию.

Язык программирования роботов Inovance [2] имеет иную архитектуру. Программа представляет собой текстовый файл с четко определенной структурой. Сначала объявляются точки движения конкретного формата, далее следует управляющий блок “Start;...End;”, внутри которого располагаются команды движения. Отсутствие стандартного постпроцессора приводит к необходимости ручного редактирования кода, что увеличивает вероятность появления ошибок. В связи с этим была поставлена задача разработки собственного постпроцессора, преобразующего линейную последовательность команд SprutCAM в структурированную программу Inovance.

Постпроцессор реализован на языке Python и построен по модульному принципу. Его работа включает последовательные этапы: нормализация входного файла SprutCAM, синтаксический анализ команд, формирование внутренней модели точек и генерацию управляющей программы для робота Inovance. На этапе предварительной обработки выполняется очистка текста от служебных Unicode-символов и приведение числовых

значений к единому формату. Далее с использованием регулярных выражений определяется тип команды (FROM, MULTIGOTO и др.) и извлекаются составные координаты, при наличии полного набора координат создается внутренняя структура точки. Каждой конфигурации автоматически присваивается индекс JP, после чего формируется объявление точки в формате, требуемом контроллером. Затем генерируются соответствующие команды движения: PHYSICGOTO и FROM преобразуются в MovJ, MULTIGOTO – в MovL. Учитываются режимы RAPID, FEDRAT и смена инструмента LOADT. На завершающем этапе программа структурируется в соответствии с требованиями языка Inovance (рисунок 2). Таким образом, программа может быть загружена на контроллер робота.

Перспективы дальнейшего развития включают реализацию полноценной поддержки дуговых перемещений Movc, добавление работы с внешними осями E1-E6, а также автоматическое определение конфигурационных параметров робота и разработку графического интерфейса пользователя.

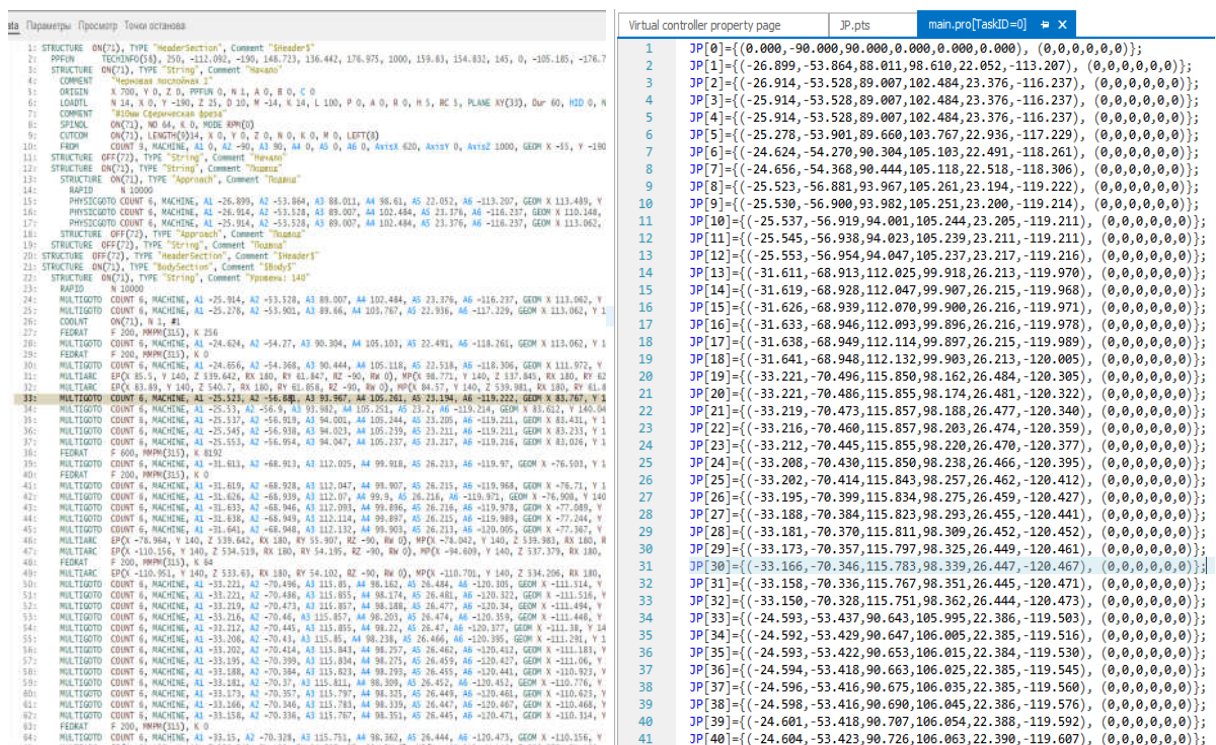


Рисунок 1 – Сопоставление вида кода в программе SprutCAM и в симуляторе InoRobotLab

1. SprutCAM. Robot Programming and Postprocessing Documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sprutcam.com/> Дата доступа 15.01.2026.

2. Inovance Technology Co., Ltd. Industrial Robot Programming Manual [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.inovance.com/global/> Дата доступа 28.01.2026.

## ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ СИМУЛИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ 3Д-МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Марченко И.С., Данильчик А.А., Германович А.П., Щеклеина В.П.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Цель данной работы – показать возможность успешного применения систем автоматизированного проектирования (САПР) для создания и симулирования подвижной 3Д-модели промышленного робота с возможностью последующего анализа его кинематических характеристик.

Задача работы – создать полноценную модель 6-осевого промышленного робота, используя модели жестких элементов конструкции (звеньев) и реализуя подвижность сочленений путем применения доступных в САПР КОМПАС-3Д сопряжений. Файл STEP-формата, содержащий 3Д-модели звеньев, доступен для скачивания на сайте производителя промышленного робота. Для данной работы используется модель робота Kawasaki RS013N [1].

Модель создается в документе формата «Сборка», где есть возможность добавлять отдельные компоненты из файлов, после их правильно ориентировать и создавать между ними связь с помощью сопряжений. Первостепенной задачей является добавление неподвижного основания, в роли которого может выступать как сама база промышленного робота, так и дополнительная подставка-пьедестал. Чтобы исключить всякую возможность перемещения и вращения основания относительно системы координат в сборке, следует обязательно зафиксировать его с помощью соответствующей функции «Включить фиксацию» для выбранного элемента в дереве проекта. Далее, последовательно добавляя звенья в сборку, необходимо задавать между ними соответствующие сопряжения (см. рисунок 1), ограничивающие избыточные степени свободы и позволяющие реализовать требуемое относительное движение звеньев 6-осевого робота.

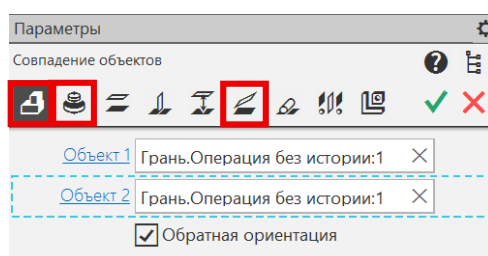


Рисунок 1 – Параметры сопряжений

В данном случае использовались такие сопряжения, как «Совпадение», «Соосность» и «Под углом» [2]. Они выделены и представлены в соответствующем порядке на рисунке 1. Наложение сопряжений доступно как через панель инструментов в верхней части окна программы, так и через функциональное окно при добавлении компонента в сборку.

Сопряжение «Совпадение» предназначено для совмещения плоскостей, граней, ребер, точек двух объектов-деталей. Использование в сборке позволяет расположить выбранные элементы в одной плоскости, устраняя возможность поступательного перемещения вдоль нормали к совмещаемым поверхностям (см. рисунок 2, слева). «Соосность» позволяет обеспечить совпадение двух осей вращения, возможность вращения вокруг единой оси сохраняется, если этому не противоречит действие иных примененных сопряжений. В сборке используется для формирования вращательных кинематических пар промышленного робота. Сопряжение «Под углом» применяется для ограничения вращения одного звена относительно другого в некотором заданном диапазоне углов согласно технической документации конкретного манипулятора. Готовая 3Д-модель робота представлена на рисунке 2, справа.

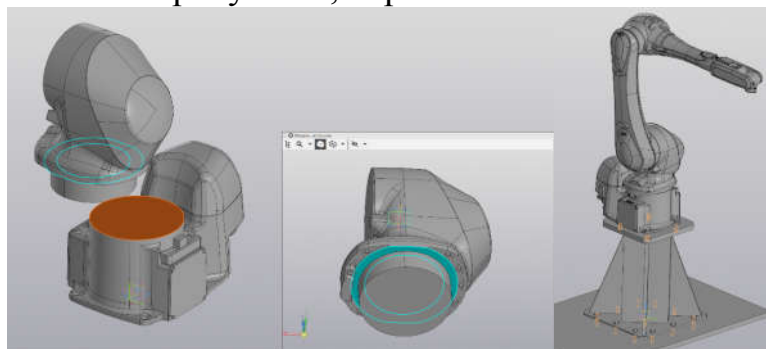


Рисунок 2 – Применение сопряжения между двумя звеньями (слева) и готовая модель промышленного робота Kawasaki RS013N (справа)

Таким образом, применение САПР обеспечивает универсальный и унифицированный подход к созданию подвижных 3Д-моделей промышленных роботов (в том числе РТК) независимо от их производителя или конструктивного исполнения, позволяет разрабатывать и симулировать функциональные модели без необходимости применения специализированного ПО конкретного производителя, которое может иметь лицензионные ограничения, а также ограничения при интеграции с другими системами.

1. Kawasaki Robotics: RS013N – Industrial robot [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kawasakirobotics.com/products-robots/rs013n/> (дата обращения: 18.02.2026).

2. АСКОН-Системы проектирования. Общие сведения о сопряжениях в КОМПАС-3D [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://help.ascon.ru/COMPAS/23/ru-U/1024\\_112\\_1\\_obshchije\\_sved\\_sopr.html](https://help.ascon.ru/COMPAS/23/ru-U/1024_112_1_obshchije_sved_sopr.html) (дата обращения: 20.02.2026).

## **ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ШЕСТИОСЕВЫХ РОБОТОВ**

**Марченко И.С., Леоник П.Д., Щеклеина В.П.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В связи с расширением сфер применения роботов-манипуляторов возникает необходимость построения сложных траекторий движений. В отличие от простых операций, где достаточно задать несколько точек, такие процессы, как фрезерование, сварка, требуют построения траектории в несколько тысяч точек. Задачи такого рода почти не разрешимы при ручном написании траектории движения робота. В таком случае рационально применять программные решения, которые автоматически генерируют точки траектории.

К таким программным продуктам относятся Autodesk PowerMill, Siemens NX CAM, Matlab Robotics System Toolbox, RoboDK, СпрутКАМ Робот. Для решения задачи генерации сложных траекторий движения такие программы применяют кинематические модели, которые позволяют вычислять перемещения роботов, учитывать их конфигурацию, ограничения окружающей среды, а также параметры инструментов. Кинематическая модель отражает величину рабочей зоны механизма, ограничения по передвижениям и безопасность работы РТК.

Кинематические модели формируются непрерывным движением в пространстве некоторой линии по определенной траектории [2]. Одним из способов создания кинематической модели является применение методов приближения или интерполяции. В промышленных роботах применяются три вида интерполяции:

- отсутствие интерполяции (move Joint);
- линейная интерполяция (move Line);
- круговая интерполяция (move Circle).

Так как траектории, необходимые для выполнения техпроцессов, редко подчиняются линейным и круговым зависимостям, то чаще всего сложные алгоритмы движения строятся на “move Joint”. В таком случае, весь путь робота разделяются на большое количество близлежащих точек, а способ перемещения робота между этими точками не имеет значение.

Рассмотрим работу таких программ на примере Autodesk PowerMill. Эта программа также содержит в себе встроенный постпроцессор, который способен автоматически генерировать NC-код для движения роботов. Большая библиотека роботов (FANUC, HIWIN, ABB и др.) делает PowerMill популярным решением для задач генерации сложных траекторий.

Программа автоматически генерирует траекторию движения робота, которая с выбранным инструментом обеспечивает выполнение требуемой

обработки. В качестве примера используем фрезерование сложной формы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Фрезерование сложной детали роботом КУКА

Использование таких программ, как Autodesk PowerMill, способно значительно облегчить программирование сложных траекторий для шестиосевых роботов и расширить сферу применения роботов.

1. Baboria M., Kainth M., Mittal R. Design and Simulation of Kuka Robotic Arm using CATIA and Power MILL Software //International Journal of Engineering Science. – 2018. – Т. 17743.

2. Резников К. Г., Медведев С. Н. Программное обеспечение для построения кинематических моделей //Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – 2020. – С. 492-496.

3. Коротков А. Н. и др. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ “КОМПАС 3D”, “3DSMAX”, “POWERMILL” ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА СТАНКЕ С ЧПУ МОДЕЛИ DMG MORI SEIKI NMV 5000 DCG //ИННОВАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ, МАШИНОСТРОЕНИИ И АВТОТРАНСПОРТЕ (ИИТМА-2020). – 2020. – С. 361-364.

## МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С СЕДЬМОЙ ОСЬЮ ЧЕРЕЗ ПЛК

Марченко И.С., Серов М.П.

Белорусский государственный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Планомерное масштабирование линий и сложности производства приводят к необходимости совмещать системы производства в одном рабочем пространстве и выдвигать требования к их синхронизации. К примеру, система роботов KUKA «Roboteam» позволяет четырем роботам работать в команде. Кроме того, роботы могут быть синхронизированы с внешними кинематическими системами, такими как позиционеры заготовок или линейные оси робота, для выполнения синхронизированных и геометрически связанных движений.

Целью данной работы является разработка технического решения для синхронизации манипулятора компании Universal Robot – UR3 и сервоусилителя SV660F Inovance с поддержкой ProfiNet при помощи ПЛК SIMATIC S7-1200. Сервопривод с абсолютных энкодером и линейным приводом будут выступать 7 осью для манипулятора:

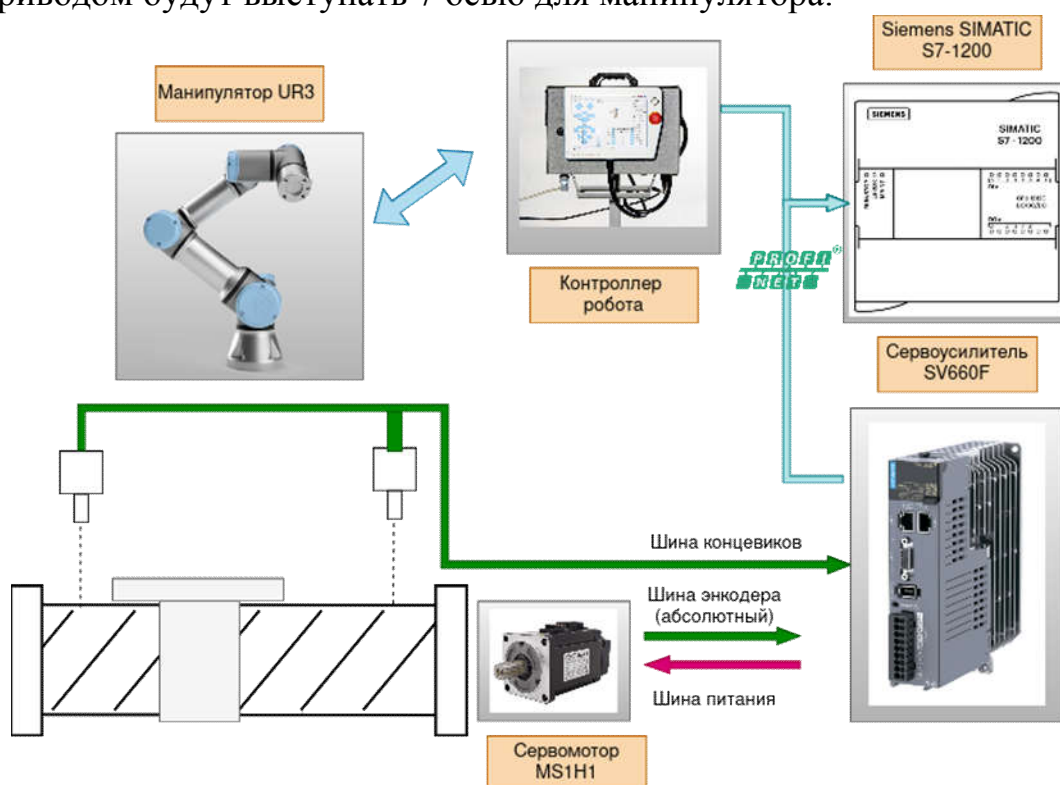


Рисунок 1 - Структурная схема подключения устройств

Контроллер манипулятора UR3 поддерживает 3 промышленных протокола: Modbus TCP, Ethernet/IP и ProfiNet. Для каждого протокола предусматривается один и тот же пакет отображаемых данных о

манипуляторе и равный доступ к управляющим регистрам. Modbus представляет собой самый простой для реализации протокол, однако он не поддерживает в своей спецификации на прикладном уровне OSI концепцию “установления соединения” и контроля частоты обмена данными. Это значит что доступ к ресурсам сервера он получает асинхронно и не подходит для процессов реального времени. Profinet, в отличие от Ethernet/IP, поддерживает изохронный режим работы, который временно переводит общую сеть TCP/IP из доступа с принципом CSMA-CD в канал с доступом TDMA. Такой подход удовлетворяет требованиям в скорости синхронизации и применения Motion Control для управления сервоприводом. Это определило выбор протокола и в соответствии с этим ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200.

Алгоритмы, используемые для управления таким синхронизированным движением, бывают двух типов. Первый тип – это генератор синхронизированных главных команд, а второй – контроллер типа «ведущий-ведомый». В нашем случае ПЛК будет выступать единым командным центром для всех синхронизируемых устройств. В таких системах с генератором запросов команды вычисляются для одних и тех же дискретных моментов времени. SIMATIC S7-1200 поддерживает удобную функцию Motion Control для разного рода осей позиционирования, которая в программном обеспечении ПЛК – TIA Portal, реализуется двумя закрытыми для просмотра операционными блоками – “MC-Interpolator” и “MC-Servo”. Они преобразуют пользовательские блоки управления “MC-Home”, “MC-MoveRelative”, “MC-Halt” и тд. в инструкции управляющих выходов PTO(pulse train output) или передаваемые телеграммы Profinet.

Карта входов-выходов в передаваемом сообщении от манипулятора разделяется в TIA Portal на 10 подключаемых модулей, которые позволяют отслеживать данные во внутренних регистрах, положение осей в реальном времени и тд. В трех модулях содержатся данные которые могут изменяться внешне.

Для удобства управления и сокращения времени пуско-наладки программ в системе может быть реализован специальный плагин URcar – встраиваемое приложение в ОС Polyscope контроллера робота. В нашем случае это позволит управлять 7 осью из единого центра. Открытое API и SDK на основе java позволяет разрабатывать необходимые URCar индивидуально под любую задачу.

1. Гируцкий, И. И. Компьютерные сети промышленной автоматизации: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0713-04 "Автоматизация технологических процессов и производств", профилизация "Автоматизация и роботизация в АПК" / И. И. Гируцкий, А. Г. Сеньков, С. И. Немирович; – Минск : БГАТУ, 2024. – 251с.

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЛЕДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА ЗА КОНВЕЙЕРОМ

**Марченко И.С., Щекало М.Н.**

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск Республика Беларусь.

В условиях современного высокоскоростного производства задача синхронизации промышленного робота с движущимся конвейером становится важной для обеспечения непрерывности технологических процессов, таких как паллетирование, упаковка и сортировка продукции. Применение подобного решения наиболее актуально в отраслях с высокоскоростным непрерывным производством, где остановка конвейера для паллетирования продукции негативно сказывается на экономических показателях производства.

В качестве практического примера реализован РТК паллетирования с функцией следования за объектом по конвейеру в рамках лабораторного стенда. РТК состоит из: коллаборативного робота UR3[3] с установленным на нем пальцевым захватом OnRobot RG2; Интегрируемый образовательный модуль “Конвейер”[4]; инкрементальный энкодер для точного определения скорости конвейера; оптический датчик для обнаружения объектов на ленте и запуска программы робота. Модель рассматриваемой установки представлена на рисунке 1.

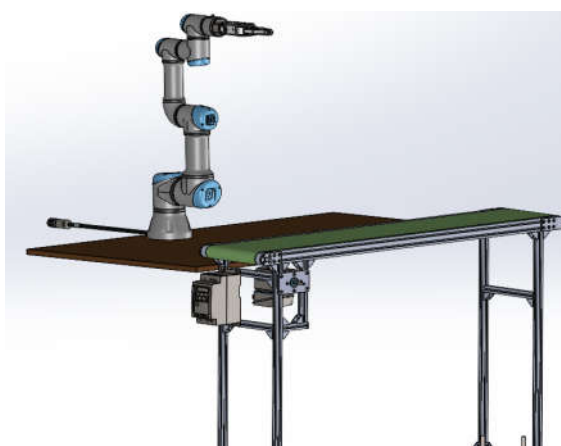


Рисунок 1 - РТК с функцией следования за конвейером

В среде программирования PolyScope роботов Universal Robots реализована встроенная функция следования за конвейером («Conveyor Tracking») [2]. Ключевые этапы настройки: создание виртуальной линии, задающая траекторию движения конвейера, путём описания двух точек в системе координат основания робота; указание типа энкодера (инкрементальный) и режима квадратуры, назначение высокоскоростных входов для подключения каналов А и В; задание типа конвейера

(линейный) и калибровки сигнала скорости, поступающего от энкодера параметром “импульсов в метре”.

Исполняемая программа робота состоит из двух частей: захват объекта и паллетирование. Команды линейного движения MoveL помещены внутрь блока «Conveyor Tracking», что обеспечивает автоматическую синхронизацию движений робота с перемещением ленты до момента захвата. После завершения блока слежения выполняется паллетирование с использованием шаблона укладки.

Для управления и контроля за работой системы, в том числе запуска выполнения программы роботом, используется ПЛК Siemens S7-1200 с панелью оператора Weintek, с их помощью реализован запуск конвейера, выбор скорости и направления ленты, аварийная остановка работы, производится обмен данными с контроллером робота по протоколу Profinet.

Таким образом осуществляется реализация функции следования манипулятора за объектом на конвейерной ленте в рамках лабораторного стенда. Такое решение демонстративно готовит студентов к применению этой функции не только на роботах Universal Robots.

Ведущие производители промышленных роботов предлагают собственные технологические решения для организации слежения за конвейером. KUKA использует программные пакеты ConveyorTech и PickControl для координации нескольких роботов с интеграцией технического зрения. FANUC реализует функцию через технологию iRPickTool в составе ROBOGUIDE, которое поддерживает уникальное круговое слежение (Circular Tracking) в сочетании с системой iRVision. Kawasaki предлагает встроенную функцию следования за конвейером как стандартную возможность контроллеров E-серии без необходимости покупки дополнительных лицензий, используя совместно с программным обеспечением технического зрения.

1. Гируцкий, И. И Технические средства автоматизации : учебное пособие / И. И. Гируцкий. – Минск : РИВШ, 2024. – 298 с.

2. Conveyor tracking with wizard [Электронный ресурс] // universal-robots.com: [сайт] – URL: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/conveyor-tracking-with-wizard/> (дата обращения 14.02.2026);

3. UR3 Technical Details [Электронный ресурс] // [https://www.universal-robots.com/media/1828034/ur3\\_tech\\_spec\\_web\\_en.pdf](https://www.universal-robots.com/media/1828034/ur3_tech_spec_web_en.pdf) (дата обращения 14.02.2026).

4. Гармаза, Д. И. Интегрируемый образовательный модуль “Конвейер” / Д. И. Гармаза, А. С. Ходатович ; науч. рук. И. С. Марченко // Актуальные вопросы и направления в инженерии : материалы 81-й студенческой научно–технической конференции БНТУ, апрель–май 2025 года / редкол.: Б. А. Бадак, Ю. В. Полозков, С. В. Александровский [и др.] ; сост.: В. А. Мартинович, А. А. Олешкевич. – Минск : БНТУ, 2025. – С. 118-120.

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОТОКОЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ**

**Марченко И.С.<sup>1</sup>, Ковалевский Р.В.<sup>2</sup>**

- 1) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь
- 2) УО «Национальный детский технопарк»  
Минск, Республика Беларусь

Традиционно при проектировании электроприводов промышленных роботов для коммуникации ПЛК с сервоусилителями, приводящими в движение серводвигатели осей промышленных роботов применялась схема управления, основанная на использовании аналоговых или импульсных сигналов. Однако в последнее время наблюдается тенденция замены этих традиционных способов связи на промышленные протоколы.

Принципиальным отличием промышленных протоколов связи от аналогово-импульсного управления является цифровая передача данных, позволяющая организовывать в рамках производства сети, в которых управляющее устройство способно быстро и надежно обмениваться информацией со всеми узлами.

На сегодняшний день самыми распространенными промышленными протоколами являются Modbus, EtherCAT, Profinet и Profibus. Однако наибольший интерес при проектировании промышленных роботов представляют протоколы EtherCAT и Profinet, так как протокол Modbus наиболее широко применяется в целях непосредственного управления техпроцессом человеком (например, для передачи данных между панелями оператора и ПЛК), а Profibus считается устаревшим по сравнению с его потомком, протоколом Profinet.

Для организации сетей EtherCAT и Profinet используются стандартные кабели RJ45 для Ethernet. При учете того, что оборудование промышленного комплекса имеет поддержку этих протоколов связи, для организации сети не требуется никаких дополнительных затрат. Однако в связи с сложностями, которые могут возникнуть в процессе настройки оборудования для правильной работы с данными протоколами, требуются высококвалифицированные специалисты.

Организация аналогово-импульсного управления электроприводом промышленного робота более проста, так как не требует такой же тонкой настройки, как EtherCAT и Profinet. Несмотря на это преимущество, такая схема управления обладает и рядом экономических и технических недостатков по сравнению с цифровыми протоколами связи.

Для создания сетей EtherCAT и Profinet требуются только кабели RJ45, причем сеть может быть организована с любой топологией, доступной

для Ethernet сетей, благодаря чему возможно сэкономить на кабелях путем последовательного соединения узлов сети. Для подключения множества электрических преобразователей с импульсной схемой управления к ПЛК требуется разведение сигнальных проводов для каждого из них, что несет негативный эффект к стоимости работа в связи с дополнительными затратами на кабели и работу по их распайке и монтажу. В случае аналогового управления также необходимы дополнительные затраты на модули расширения ПЛК с аналоговыми выходами.

Рассмотрим экономическую выгоду реализации управления с помощью промышленных протоколов на примере подключения сервоусилителя Inovance SV670-INT к ПЛК Inovance. Для организации аналогово-импульсного управления требуется приобретение модуля с аналоговыми выходами для ПЛК. На момент проведения анализа, по данным официального дистрибьютора компании Inovance в Республике Беларусь ООО «Балтаком Электроникс», цена модуля GL20-4DA-INT составляет 411,0 BYN. Допустим, что нормочас работы техника-электрика составляет 100 BYN, а на распайку одного кабеля уходит 15 минут. Стоимость одного метра медного кабеля с семью жилами примем равной 10 BYN, а требуемая длина кабеля — 2 метра. Таким образом, общая стоимость организации аналогового управления сервоусилителем составит 456 BYN.

Для организации управления сервоусилителем серии SV670 с поддержкой протокола EtherCAT в таких же условиях потребуется только приобретение патч-корда RJ45 длиной 2 метра. Цена патч-корда CAT-7 длиной 2 метра составляет ~20 BYN.

Таким образом, использование промышленного протокола EtherCAT может позволить сэкономить ~436 BYN для подключения только одного сервоусилителя к ПЛК. С учетом того, что сервоусилители промышленных роботов обычно располагаются рядом друг с другом, а протокол EtherCAT позволяет соединять сервоусилители последовательно, при подключении большего количества сервоусилителей к ПЛК потребуются кабели меньшей длины, чем при аналоговом управлении, благодаря чему экономия будет становиться только выше.

1. Гируцкий, И. И. Компьютерные сети промышленной автоматизации: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0713-04 "Автоматизация технологических процессов и производств", профилизация "Автоматизация и роботизация в АПК" / И. И. Гируцкий, А. Г. Сеньков, С. И. Немирович; – Минск : БГАТУ, 2024. – 251с.

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

**Матрунчик Ю.Н., Гутич И.И., Павлов М.И.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

Современное развитие робототехники характеризуется расширением областей применения мобильных автоматических систем. В промышленности, логистике и сфере обслуживания все чаще используются автономные мобильные роботы, способные выполнять задачи без непосредственного участия человека. Одним из ключевых условий эффективной эксплуатации таких роботов является обеспечение их энергетической автономности. Несмотря на совершенствование аккумуляторных батарей, все они требуют периодической подзарядки. Ручное подключение зарядного устройства или замена батарей снижают общую эффективность автоматизации, так как требуют присутствия оператора и увеличивают время простоя техники. В связи с этим разработка автоматических зарядных станций (АЗС), обеспечивающих самостоятельную стыковку робота с источником питания, является актуальной научно-технической задачей [1].

Анализ современных подходов к организации автоматической зарядки мобильных роботов показывает, что данная проблема находится на стыке нескольких научных направлений: теории автоматического управления, навигации мобильных роботов, силовой электроники и теории надежности. Вопросы построения систем наведения роботов на зарядные устройства подробно рассматриваются в трудах по промышленной робототехнике [2]. Существующие решения можно классифицировать по способу передачи энергии (контактный и бесконтактный) и по методу наведения на станцию (пассивные и активные системы).

Контактный способ передачи энергии отличается простотой реализации и высоким коэффициентом полезного действия, однако предъявляет повышенные требования к точности позиционирования робота относительно зарядных клемм. Для обеспечения надежного электрического соединения применяются различные механические направляющие и самоцентрирующиеся конструкции, компенсирующие погрешности позиционирования [3]. Бесконтактный (индукционный) способ менее критичен к точности стыковки, но сложнее в реализации, имеет меньший КПД и требует дополнительных мер по электромагнитной совместимости.

Методы наведения робота на зарядную станцию разнообразны. Наиболее простыми и надежными считаются методы, основанные на использовании инфракрасных (ИК) маяков и фотоприемников. Робот, двигаясь в зоне действия сигнала, корректирует свою траекторию таким

образом, чтобы выйти на точку стыковки. Данный подход хорошо изучен и широко применяется в бытовых роботах-пылесосах. Более сложные методы предполагают использование ультразвуковых дальномеров, лазерных сканеров или индуктивных датчиков, реагирующих на проложенный в полу проводник [4].

В теоретических исследованиях, посвященных автоматическим зарядным станциям, рассматриваются различные аспекты их построения. Структурная схема АЗС в общем случае включает следующие основные компоненты: стационарный блок питания с управляемым коммутатором, контроллер станции на базе микропроцессора, блок сопряжения с роботом (механические направляющие, токосъемные контакты), а также набор датчиков для обнаружения робота и контроля процесса стыковки (концевые выключатели, инфракрасные датчики приближения). На борту робота устанавливаются ответные токосъемники и пассивные элементы (направляющие штыри или ролики), взаимодействующие с механическими ловителями станции.

Общий алгоритм функционирования АЗС в литературе описывается следующим образом. При снижении заряда аккумулятора ниже заданного порога бортовая система управления робота инициирует процесс автоматической стыковки. Робот, используя карту помещения и данные одометрии, перемещается в зону предполагаемого нахождения станции. При попадании в зону действия ИК-маяка (или при механическом контакте с направляющими) робот переходит в режим точного наведения. Механические направляющие, имеющие, например, воронкообразную форму, обеспечивают коррекцию траектории при финальном подъезде, направляя токосъемники робота на зарядные контакты станции. После замыкания контактов срабатывают концевые датчики, и контроллер станции подает питание на зарядные клеммы. По завершении заряда или при попытке робота покинуть станцию питание отключается.

1. Поедин Ю.С. Робототехника в промышленности. – М.: ЛитРес, 2022. – 320 с.
2. Псигин Ю.В., Рязанов С.И. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Робототехника, робототехнические комплексы. – М.: 2024. – 400 с.
3. Иванов А.А., Петров Б.В. Автоматизация процесса зарядки мобильных роботов на производстве // Вестник машиностроения. – 2024. – № 3. – С. 45–51.
4. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Системы технического зрения в робототехнике. – Томск: Изд-во Томского университета, 2021. – 248 с.

## **РТК НАНЕСЕНИЯ СИЛИКОНОВОГО УПЛОТНЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИЗДЕЛИЯ НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА**

**Матрунчик Ю.Н., Шиш Е.Н.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

Автоматизация технологических процессов является одним из ключевых направлений развития современного машино- и приборостроения. В условиях повышения требований к качеству продукции, гибкости производства и снижению производственных затрат особую актуальность приобретает внедрение робототехнических комплексов (РТК). Применение промышленных роботов в технологических операциях подробно рассмотрено в фундаментальных трудах по промышленной робототехнике, где подчёркивается их роль в обеспечении стабильности параметров процессов и повышении производительности.

Одной из ответственных операций в приборо- и машиностроении является нанесение силиконовых герметиков и уплотнений на корпусные изделия. Традиционный ручной способ характеризуется нестабильной толщиной слоя, отклонениями геометрии шва и зависимостью качества от квалификации оператора. Согласно современным исследованиям в области роботизации промышленности [1], автоматизация подобных операций позволяет существенно повысить повторяемость и минимизировать влияние человеческого фактора.

Целью настоящей работы является разработка структуры и принципов функционирования робототехнического комплекса для автоматизированного нанесения силиконового уплотнения с использованием коллаборативного робота.

Теоретической основой разработки послужили положения автоматизации производственных процессов и построения робототехнических комплексов, изложенные в профильных учебных изданиях [2]. Разработанный РТК включает следующие основные элементы: коллаборативный робот-манипулятор, систему дозирования силиконового материала, устройство фиксации изделия, систему управления и программное обеспечение.

Использование коллаборативного робота обусловлено его конструктивными особенностями, обеспечивающими безопасное взаимодействие с оператором и возможность эксплуатации без массивных защитных ограждений. Вопросы проектирования робототехнических комплексов и особенности их внедрения в гибкие производственные системы подробно рассмотрены в работах по автоматизации производства. Коллаборативные системы позволяют организовать совместную работу

человека и робота в ограниченном пространстве производственного участка, что особенно актуально для мелкосерийного и среднесерийного производства.

Технологический процесс нанесения силиконового уплотнения включает позиционирование изделия в рабочей зоне, формирование траектории движения инструмента, синхронизацию перемещения манипулятора с подачей материала и завершение операции. Траектория движения формируется на основе геометрии изделия и задаётся в системе программирования робота. Существенным фактором качества является поддержание постоянной скорости перемещения инструмента и стабильного расхода герметика.

Для повышения точности нанесения реализуется предварительная калибровка инструмента и рабочей системы координат. Это позволяет компенсировать возможные погрешности установки изделия и обеспечить повторяемость траектории. Перспективным направлением совершенствования комплекса является интеграция систем технического зрения и адаптивного управления, что соответствует современным тенденциям развития автоматизации в промышленности [3].

Анализ применения разработанного РТК показывает, что автоматизация процесса нанесения силиконового уплотнения обеспечивает повышение стабильности геометрических параметров шва, снижение вероятности дефектов (разрывов, пропусков, избыточных наплывов материала) и сокращение времени технологического цикла. Дополнительным преимуществом является гибкость переналадки комплекса под изделия различной конфигурации за счёт изменения программной траектории и параметров дозирования без значительной модернизации оборудования.

Таким образом, разработанный робототехнический комплекс нанесения силиконового уплотнения на базе коллаборативного робота соответствует современным требованиям автоматизации технологических процессов. Его внедрение способствует повышению качества продукции, снижению влияния человеческого фактора и росту производственной эффективности. Дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие интеллектуальных методов управления и расширение функциональных возможностей комплекса.

1. Почанин Ю.С. Робототехника в промышленности. – М.: ЛитРес, 2022. – 320 с.
2. Псигин Ю.В., Рязанов С.И. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Робототехника, робототехнические комплексы. – М.: 2024. – 400 с.
3. Белов Н.В. Современные направления развития автоматизации в промышленности // Автоматизация в промышленности. – 2024. – №5.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Матрунчик Ю.Н., Шклёда Д.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

Современные условия эксплуатации зданий и сооружений предъявляют повышенные требования к безопасности, надежности и энергоэффективности объектов капитального строительства. Усложнение инженерных систем, рост этажности, а также физический износ фонда зданий обуславливают необходимость внедрения новых подходов к контролю их технического состояния. Традиционные методы, базирующиеся на периодических осмотрах и ручных замерах, обладают низкой оперативностью и не позволяют фиксировать динамику изменения параметров в режиме реального времени. Это создает риск пропуска предаварийных состояний.

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что в настоящее время наиболее эффективным способом решения данной задачи является оснащение объекта строительства стационарной системой мониторинга несущих конструкций, функционирующей в режиме реального времени.[1]

Анализ современных подходов к проектированию систем мониторинга показал актуальность разработки данных систем на основе качественного анализа исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий, проводимого в автоматизированном режиме по заранее разработанным алгоритмам, а также применения средств автоматизации на основных этапах проектирования данных систем.[2]

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ нормативной технической документации, отечественных и зарубежных научных исследований в области разработки систем мониторинга зданий и сооружений, изучение методологии построения контрольно-измерительных систем, определение основных этапов разработки систем мониторинга для строительных сооружений.

2. Разработка алгоритма и программы определения рационального режима мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

3. Разработка алгоритма и программы автоматизации определения наиболее напряженных и деформированных элементов несущих конструкций.

4. Разработка методики автоматизированного определения рациональной по составу, параметрам и расположению датчиков системы мониторинга.

5. Разработка информационной технологии проектирования систем мониторинга для объектов строительства.

6. Апробация информационной технологии проектирования систем мониторинга на объектах строительства.

7. Формулировка перспективных направлений дальнейших исследований по теме.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии построения распределенных систем контроля для задач строительного мониторинга и эксплуатации зданий.

Практическая значимость определяется тем, что разработанная система позволяет обеспечить непрерывный автоматический контроль за деформациями конструкций и работой инженерного оборудования, снизить риски возникновения аварийных ситуаций за счет оперативного выявления отклонений, сократить эксплуатационные затраты благодаря оптимизации режимов работы инженерных систем и переходу к обслуживанию по фактическому состоянию, а также создать объективную базу данных о техническом состоянии объекта для использования при проведении экспертиз и планировании ремонтов.

Теоретической базой исследования послужили работы в области автоматизации, строительной механики и цифровой обработки сигналов. В работе использованы методы системного анализа, теории надежности, объектно-ориентированного программирования и математической статистики. Экспериментальные исследования проводились с применением методов натуральных измерений и сравнительного анализа. В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Разработана функциональная и структурная схемы автоматизированной системы мониторинга, обоснован выбор компонентов (контроллеры, датчики, коммуникационное оборудование).[2]

2. Создано программное обеспечение верхнего уровня, реализующее функции сбора, архивации и визуализации данных в виде мнемосхем и графиков.

3. Проведена апробация системы на экспериментальном стенде, в ходе которой подтверждена её работоспособность и точность измерений.

4. Доказана эффективность применения предложенных алгоритмов для раннего обнаружения критических изменений контролируемых параметров.

1. Гроздов В.Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. – СПб.: Издательский дом «KN+», 2020. – 240 с.

2. Матвеев А.В., Еремеев П.Г. Автоматизированные системы мониторинга несущих конструкций высотных зданий // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – №5 – с. 45-52

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

**Матрунчик Ю.Н.<sup>1</sup>, Прохорович С.С.<sup>1</sup>, Артемьев А.С.<sup>2</sup>, Волейко  
М.В.<sup>2</sup>**

1).Белорусский национальный технический университет;

2).УО «Национальный детский технопарк»

Минск, Республика Беларусь.

В современных условиях, когда импортные решения становятся все более дефицитными, разработка отечественного станка с числовым программным управлением для обработки печатных плат позволяет наладить локальное производство, снизить затраты на разработку и ускорить цикл создания электронных устройств.

Эта тема имеет большое значение для Республики Беларусь, как и острая необходимость в подготовке кадров для проектирования, программирования и эксплуатации автоматизированных и роботизированных систем.

Данная автоматизированная система фрезерования печатных плат, предназначенная для прототипирования и мелкосерийного производства, была разработана Артёмом Сергеевичем Артемьевым и Матвеем Викторовичем Волейко, учащимися Национального детского технопарка, в рамках учебной программы дистанционного обучения робототехнике для одаренных детей и молодежи.

Программа направлена на стимулирование обучения учащихся путем приобретения методических и теоретических знаний, а также практических навыков для проведения научно-исследовательских и изобретательских проектов в области робототехники и автоматизации производственных процессов.

Этапы реализации проекта:

1. Исследование и анализ потребностей

Определение характеристик целевой системы:

- максимальные размеры и габариты обрабатываемых печатных плат;
- поддержка двустороннего фрезерования;
- типы фрез и шпинделей для фрезерования электрических печатных плат;
- автоматическая смена инструмента.

2. Проектирование системы:

- разработка концепции автоматизированного устройства;
- выбор датчиков (оптических, химических, инфракрасных, магнитометрических).

3. Разработка программной архитектуры для обработки данных и построения аналитических моделей.

#### 4. Прототипирование:

- создание первоначальной экспериментальной версии устройства с набором основных функций;
- лабораторные испытания для проверки точности измерений и работы устройства.
- тестирование пользовательского интерфейса.

#### 4. Алгоритмы анализа и обработки данных:

- разработка математических моделей анализа для производства печатных плат (PCB);
- оптимизация алгоритмов с использованием тестовых наборов данных;
- внедрение механизмов автоматической калибровки датчиков.

#### Проект позволит:

- Разработать и собрать прототип станка с ЧПУ, предназначенного для высокоточной фрезеровки одно- и двухсторонних печатных плат, адаптированного для мелкосерийного производства. - Интегрировать систему автоматизации, включающую датчики положения, механизмы защиты и элементы самодиагностики, для обеспечения стабильной и безопасной работы оборудования.

- Разработать техническую документацию, включая руководство пользователя, схемы подключения, технические характеристики компонентов и рекомендации по техническому обслуживанию.

- Подготовить учебные материалы, учебные пособия и сценарии обучения для интеграции устройства в учебные программы высших учебных заведений.

- Разработка дорожной карты уровня технологической готовности (TRL), отражающей этапы технологической зрелости проекта, от прототипа до готового продукта.

Проект по созданию автоматизированной системы фрезерования печатных плат открывает широкие перспективы развития: от крупномасштабной индустриализации и интеграции в образовательные учреждения до интеграции в цифровые производственные экосистемы. Будущие разработки включают создание модульных решений с расширенными функциональными возможностями (сверление, лазерная гравировка, пайка), внедрение открытой архитектуры для инженерных сообществ и выход на рынки стран ЕАЭС и СНГ с адаптацией.

1. Технология фрезерных работ: учебник для нач. проф. образования / Т. А. Багдасарова. – 2-е изд., перераб. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 128 с.

2. Фрезерные работы: пособие к лабораторным работам для студентов специальности 1-08 01 01-01 «Профессиональное обучение (по направлениям)», направления специальности 1-08 01 01-01 «Профессиональное обучение (машиностроение)» / Е. П. Дирвук. – Минск: БНТУ, 2018. – 105 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Махнач Н.А., Качанов И.В., Жук А.Н.

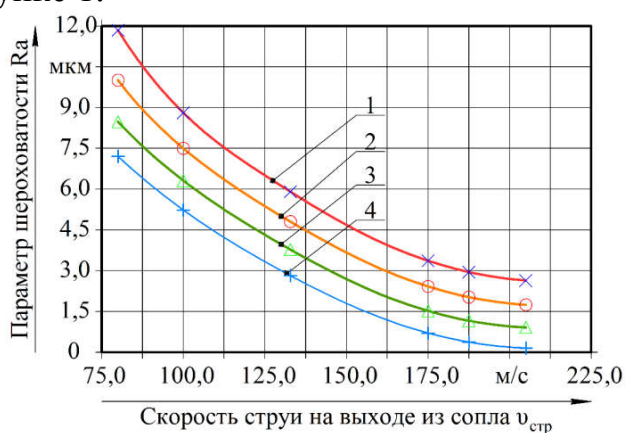
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время для обработки листовых материалов широко используется реверсивно-струйная очистка поверхностей от коррозии [1].

К числу основных технологических факторов, влияющих на качество обработанной поверхности (основными параметрами качества поверхности для проведения исследований выбраны параметр шероховатости  $R_a$  и микротвердость поверхностного слоя  $H_\mu$ ), на основании проведенных исследований относятся:

- скорость струи рабочей суспензии  $v_{стр}$  на выходе из конического сопла (КС);
- расстояние  $L$  от выходного сечения КС до очищаемой поверхности;
- коэффициенты обжатия струи  $\lambda$  и степень сужения сопла  $n$ .

Результаты исследования по влиянию скорости струи  $v_{стр}$  рабочей суспензии на изменение параметра шероховатости  $R_a$  поверхности приведены на рисунке 1.

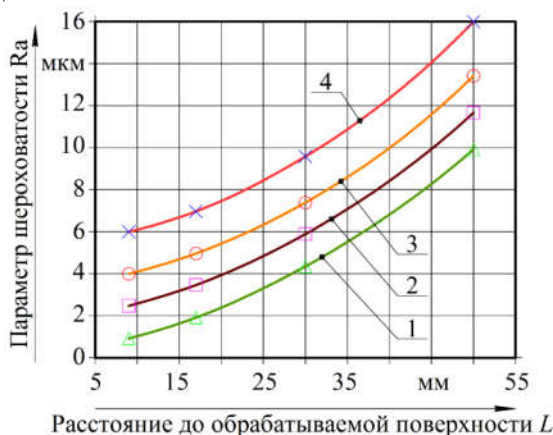


1 –  $L = 50$  мм; 2 –  $L = 30$  мм; 3 –  $L = 16$  мм; 4 –  $L = 8$  мм;  $\lambda = 0,063$ ;  
 $K_6 = 3,5$  %;  $K_{к.с.} = 1,0$  %;  $d_c = 1,2$  мм;  $\rho = 1045$  кг/м<sup>3</sup>;  $p_{вх} = 20$  МПа;  
 материал – Ст3пс

Рисунок 1 – Влияние скорости струи  $v_{стр}$  на выходе из сопла на параметр шероховатости  $R_a$  очищенной поверхности

Из анализа графиков на рисунке 1 видно, что при увеличении скорости  $v_{стр}$  от 75 до 202 м/с параметр шероховатости поверхности  $R_a$  уменьшается в среднем в 3,5–4 раза, достигая значения 0,4–3,5 мкм в диапазонах скоростей  $v_{стр} = 160$ –202 м/с и расстояний  $L = 8$ –50 мм. Отмеченное существенное уменьшение величины  $R_a$  объясняется эффектом от дополнительного воздействия реактивной силы при воздействии реверсивной струи на очищаемую поверхность.

Из графиков на рисунке 2 видно, что с уменьшением расстояния  $L$  от торца КС до обрабатываемой поверхности эффективность очистки повышается. Это можно объяснить повышением силового воздействия рабочей суспензии на очищаемую поверхность за счет отсутствия эффекта раскрытия «факела» струи. Как видно из рисунка 2 параметр шероховатости  $R_a$  уменьшается от 13 мкм до 2–4 мкм при уменьшении расстояния  $L$  от 50 до 8 мм.



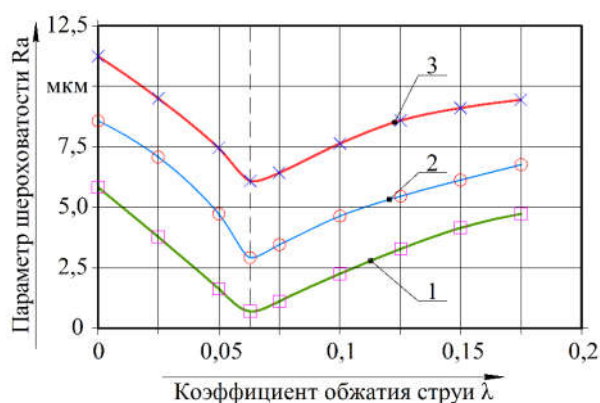
1 –  $p_{вх} = 23$  МПа; 2 –  $p_{вх} = 20$  МПа; 3 –  $p_{вх} = 17$  МПа; 1–3 –  $\lambda = 0,063$ ;  
 4 –  $p_{вх} = 23$  МПа при  $\lambda = 0$ ;  $K_б = 3,5$  %;  $K_{к.с.} = 1,0$  %;  $d_c = 1,2$  мм;  
 материал – Ст3пс

Рисунок 2 – Влияние расстояния  $L$  от торца КС до очищаемой поверхности на параметр шероховатости  $R_a$

Данные рисунка 2 показывают также, что при давлении на входе в КС  $p_{вх} = 20$  МПа (кривая 2), расстоянии  $L = 8–30$  мм величина параметра шероховатости  $R_a$  на очищенной поверхности находится в диапазоне значений 2–5 мкм, которые вполне могут быть использованы при определенной технологической обработке поверхности для осуществления операции лазерной резки листового материала, например, в условиях СООО «Элезер».

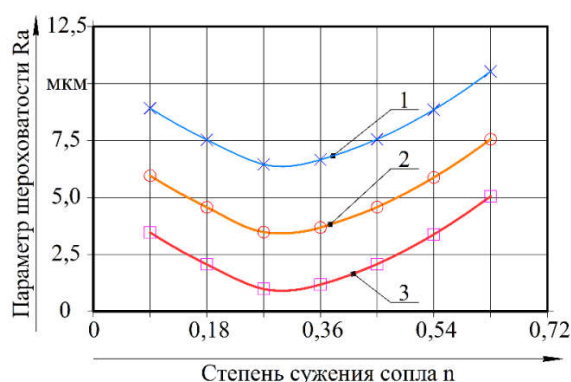
На рисунке 3 представлены графики изменения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  в зависимости от изменения коэффициента обжатия струи  $\lambda$ . Как следует из рисунка, имеется оптимальный диапазон значений коэффициента обжатия  $\lambda$ , равный 0,05–0,08, в рамках которого независимо от величины давления  $p_{вх}$  параметр шероховатости  $R_a$  резко уменьшается на 15–20 % по сравнению со значениями за пределами этого диапазона. Оценивая этот диапазон, можно отметить, что он полностью совпадает со значениями коэффициента  $\lambda$ , при которых на всех режимах струйного воздействия и сила воздействия струи имеет максимальное значение.

Оценивая приведенные данные, можно отметить, что существует для процесса РСО диапазон значений коэффициента обжатия  $\lambda = 0,05–0,08$ , в рамках которого имеется обратная зависимость между величиной параметра шероховатости  $R_a$  на очищаемой поверхности и значением силы давления  $F$  от воздействия струи на эту же поверхность.



$L = 16$  мм; 1–3 –  $p_{\text{вх}} = 23, 20, 17$  МПа соответственно;  $K_{\text{б}} = 3,5$  %;  
 $K_{\text{к.с.}} = 1,0$  %;  $d_{\text{с}} = 1,2$  мм; материал – Ст3пс

Рисунок 3 – Влияние коэффициента обжатия струи  $\lambda$  на параметр шероховатости Ra



$L = 16$  мм; 1–3 –  $p_{\text{вх}} = 17, 20, 23$  МПа соответственно;  $K_{\text{б}} = 3,5$  %;  
 $K_{\text{к.с.}} = 1,0$  %;  $\lambda = 0,063$ ;  $d_{\text{с}} = 1,2$  мм; материал – Ст3пс

Рисунок 4 – Влияние степени сужения сопла  $n$  на параметр шероховатости Ra

Как видно из приведенных на рисунке 4 кривых, независимо от величины давления  $p_{\text{вх}}$  имеется диапазон значений степени сужения сопла  $n = 0,18–0,54$ , в рамках которого параметр шероховатости Ra приобретает минимальное значение по отношению к тем величинам, которые были установлены для всего исследованного диапазона  $n = 0,09–0,63$ . Очевидно, что достигнутый эффект по снижению параметра шероховатости Ra на 10–12 % в диапазоне значений  $n = 0,18–0,54$  обеспечивается за счет минимизации потерь напора. В результате такого гидродинамического эффекта происходит повышение скорости струи на выходе из КС, приводящее к увеличению силового воздействия рабочей суспензии на очищаемую поверхность и, как следствие, к повышению эффективности процесса РСО [1].

1. Жук, А.Н. Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхностей стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой: дис. канд. техн. наук : 05.02.07 / А.Н. Жук. – Минск, 2022. – 201 л.

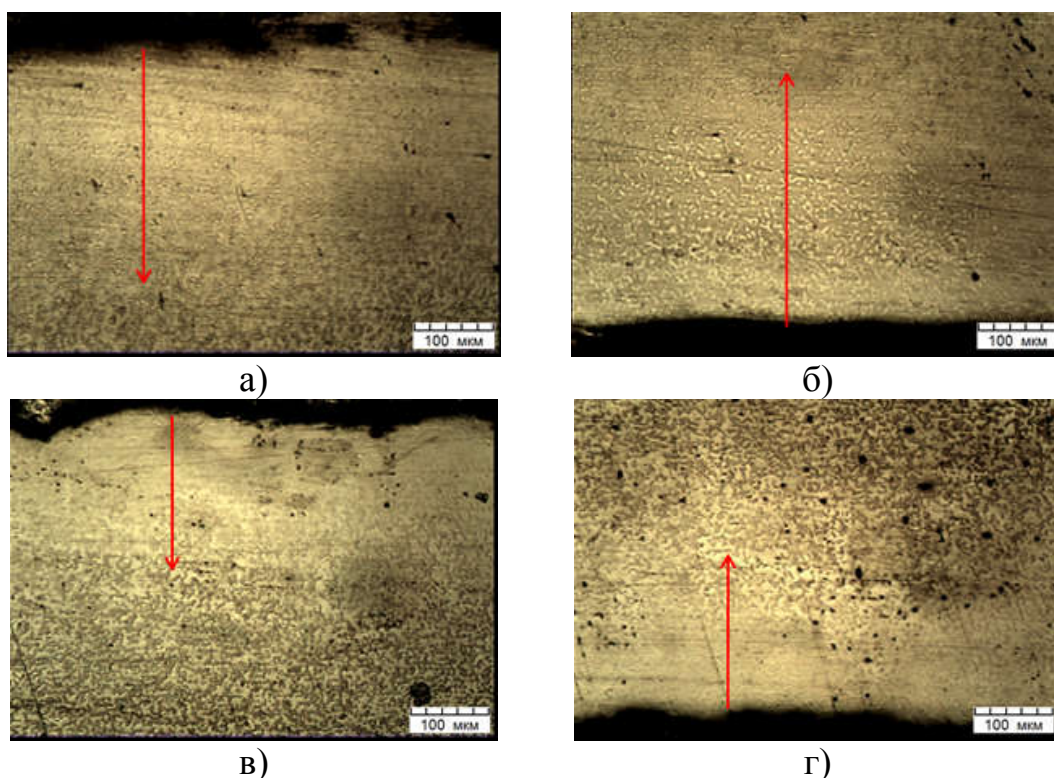
## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ

Мезенцев А.М., Качанов И.В., Жук А.Н.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Исследование микроструктуры обработанных материалов является приоритетной задачей для лазерной резки после проведения реверсивно-струйной очистки (РСО), в том числе с применением бентонитовой глины. Микроструктура образцов изучалась на микроскопе «МИКРО-200».

Для образцов № 1, 2 были изготовлены шлифы для анализа изменений микроструктуры в поперечном сечении. Съемка микроструктуры проводилась как со стороны обработки в режиме РСО (рисунок 1, а, в), так и с обратной стороны, где обработка отсутствовала (рисунок 1, б, г). Как видно из приведенных снимков, поверхность образца со стороны обработки имеет волнистый вид, в то время как с другой стороны – ровный. Глубина измененной микроструктуры с обеих сторон составляет порядка 290 мкм (образец № 1) и 200 мкм (образец № 2).



а, б – микроструктура на поверхностях образца № 2; в, г – микроструктура на поверхностях образца № 1; а, в – микроструктура на поверхностях обработки в образцах № 2, 1 соответственно; б, г – микроструктура на поверхностях образцов № 2, 1 без обработки (x200)

Рисунок 1 – Микроструктура на поверхностях образцов после различных видов обработки

При увеличениях в приповерхностной зоне с обеих сторон образца прослеживается изменение количественного соотношения фаз феррит/перлит, а также уменьшение размеров зерен перлита (рисунок 2).

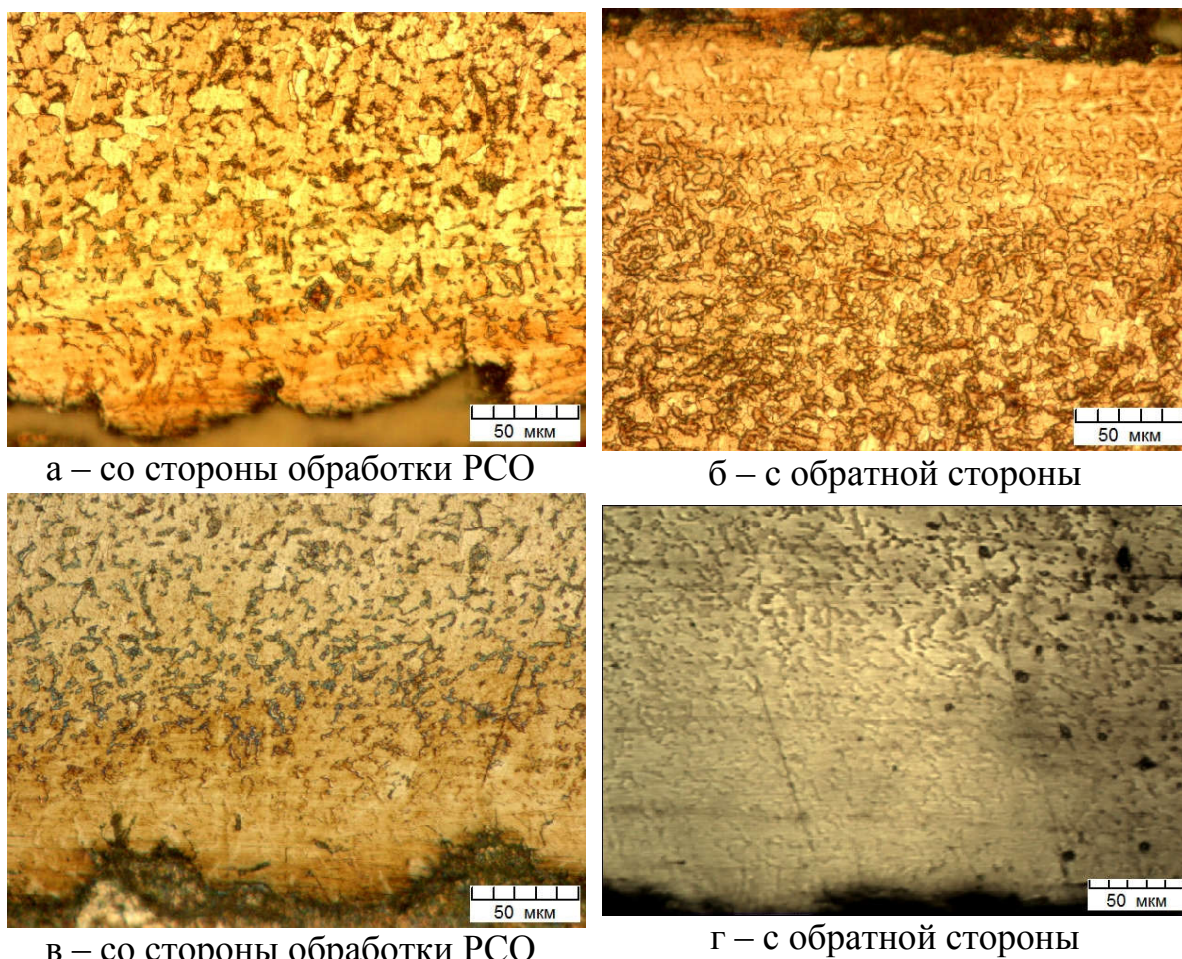


Рисунок 2 – Микроструктура образцов № 2 (а, б) и № 1 (в, г) со стороны воздействия РСО (а, в) и с обратной (необработанной) стороны (б, г) (x500)

Наглядно данное изменение микроструктуры хорошо прослеживается при сравнении центральной части образцов и поверхностей, подверженных РСО (рисунок 3).

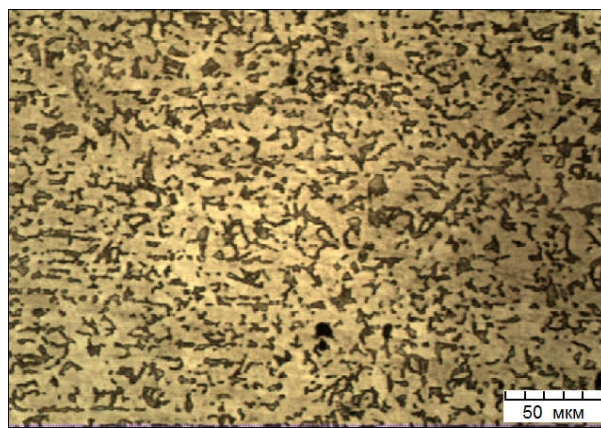
В центре образцов перлит имеет измененный вид (рисунок 3).

После рассмотрения микроструктур на поверхности со стороны обработки можно отметить чистый контрастный волнистый профиль в образце №2 за счет отсутствия на обработанной поверхности продуктов повторной коррозии (результат действия защитной бентонитовой пленки, блокирующей процессы повторной коррозии на очищенной поверхности).

В образце № 1 поверхность обработки размытая, не контрастная за счет образования на ней оксидов  $Fe_2O_3$  в результате повторной коррозии из-за отсутствия на этой поверхности защитного пленочного покрытия.



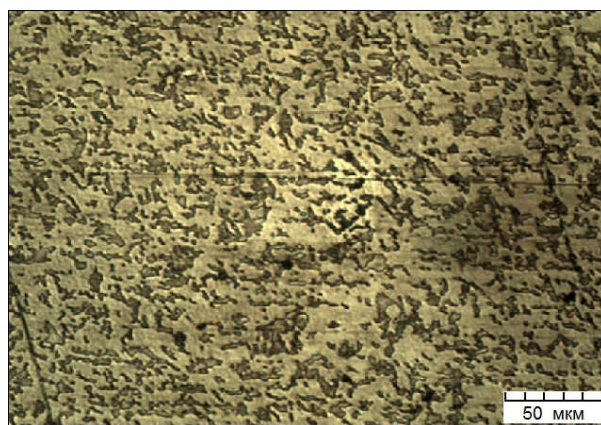
а – под обработанной поверхностью



б – в центре



в – под обработанной поверхностью



г – в центре

Рисунок 3 – Микроструктура образцов № 2 (а, б) и № 1 (в, г) под обработанной поверхностью (а, в) и в центре (б, г)

Оценивая полученные результаты микроструктурного анализа на обработанной поверхности, можно сделать однозначный вывод о том, что РСО с применением бентонитовой глины приводит к эффективной очистке поверхности, сопровождается благоприятными микроструктурными изменениями и обеспечивает эффективное блокирование процесса повторной коррозии на очищенной поверхности за счет создания защитного пленочного покрытия, исключающего доступ кислорода к очищенной поверхности, а, следовательно, и протекание процесса повторной коррозии на этой поверхности, что существенно улучшает качество лазерной резки.

1. Жук, А.Н. Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхностей стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой: дис. канд. техн. наук : 05.02.07 / А.Н. Жук. – Минск, 2022. – 201 л.

2. Способ очистки металлических поверхностей : пат. ВУ 21512 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко. – Оpubл. 30.12.2017.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОТСЕВА ВЫБРОСОВ БОЛЬШОЙ ВЫБОРКИ

Напрасников В.В.<sup>1</sup>, Напрасникова Ю.В.<sup>2</sup>, Соловьев А.Н.<sup>3</sup>

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь;

2) Унитарное предприятие «Калийпроект»  
Минск, Республика Беларусь;

3) Крымский инженерно-педагогический университет  
Симферополь, Российская Федерация.

Целью данной работы является программная реализация построения боксплота («ящик с усами») для наглядного представления о распределении значений в среде MATHCAD 15. Boxplot («ящик с усами») это графический и аналитический метод описательной статистики, предназначенный для визуализации распределения числовых данных, оценки их локации, разброса, асимметрии и идентификации потенциальных выбросов в выборке.

Особенностью представляемой программной реализации является добавление отсечки, соответствующей уровню экстремальных (жестких) выбросов, что повышает наглядность представления обрабатываемой информации и повышает достоверность принимаемых решений.

Пусть имеется одномерная выборка данных  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , упорядоченная по возрастанию:  $x_{1p} \leq x_{2p} \leq \dots \leq x_{np}$ .

Модель основывается на пяти статистиках:

$Q_0$  (Минимум):  $x_{1p}$  (наименьшее наблюдение, без учета выбросов).

$Q_1$  (Первый квартиль, 25-й перцентиль). Для выборки объемом  $n$  позиция определяется как:

$$L_1 = 0.25 \cdot (n + 1). \quad (1)$$

$Q_2$  (Медиана, 50-й перцентиль): Значение, делящее выборку пополам.

$$L_2 = 0.5 \cdot (n + 1). \quad (2)$$

$Q_3$  (Третий квартиль, 75-й перцентиль). Значение, ниже которого расположено 75% данных.

$$L_3 = 0.75 \cdot (n + 1). \quad (3)$$

$Q_4$  (Максимум):  $x_{np}$  (наибольшее наблюдение, без учета выбросов).

Определение межквартильного размаха (IQR — Interquartile Range):

$$IQR = Q_3 - Q_1. \quad (4)$$

Это робастная мера статистического разброса данных, нечувствительная к экстремальным значениям.

Выбросы (Outliers):

Все наблюдения  $x_i$ , такие что  $x_i < Q_1 - k \cdot IQR$  или  $x_i > Q_3 + k \cdot IQR$ , идентифицируются как потенциальные выбросы.

Для идентификации экстремальных (жестких) выбросов используется коэффициент  $k = 3.0$ . Соответствующим образом строятся дополнительные усы (отсечки) Lower Whisker2, L2), (Upper Whisker2, U2).

Фрагмент документа с процедурой отсева жестких выбросов представлен на рисунке 1.

```

USI_OTSEV_JESTK(X) :=
  Nrows ← rows(X)
  Xsr ← mean(X)
  SX ← stdev(X)
  KV_1 ← KVARTIL_N(X, 1)
  KV_3 ← KVARTIL_N(X, 3)
  Rμ ← KV_3 - KV_1
  for J ∈ 1 .. Nrows
    NumJ-1 ← J
  NumX ← augment(Num, X)
  NumX_rez ← NumX
  K ← -1
  for J ∈ 0 .. Nrows - 1
    if [ (XJ < KV_1 - 3·Rμ) ∨ (XJ > KV_3 + 3·Rμ) ]
      K ← K + 1
      Nrows_delK,0 ← J + 1
      Nrows_delK,1 ← XJ
      NumX_rez ← Del_ROWS_N(NumX_rez, J - K)
  return (Nrows_del NumX_rez)

```

Рисунок 1. Фрагмент документа с процедурой отсева жестких выбросов

Использование инструмента для решения реальной задачи по 150 геологическим пробам представлено на рисунке 1 и 2. Найдено 9 мягких и 10 экстремальных выбросов, фрагмент документа с результатами вычислений представлен на рисунке 2.

**ТОЛЬКО для МЯГКИХ выбросов НОМЕРА точек и значения точек удаляемых**

Rez\_MIAGK := USI\_OTSEV\_MIAGK(X)

$$\begin{pmatrix} \text{Rez\_MIAGK}^T \\ 0 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 11 & 53 & 66 & 68 & 103 & 105 & 126 & 131 & 142 \\ 2.114 & 2.212 & 2.211 & 2.208 & 2.114 & 2.115 & 2.217 & 2.228 & 2.101 \end{pmatrix}$$

**ТОЛЬКО для ЖЕСТКИХ выбросов НОМЕРА точек и значения точек удаляемых**

Rez\_JEST := USI\_OTSEV\_JESTK(X)

$$\begin{pmatrix} \text{Rez\_JEST}^T \\ 0 \end{pmatrix}^T = \begin{array}{c|cccccccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \hline 0 & 10 & 12 & 24 & 27 & 85 & 87 & 106 & 107 & 120 & 128 & 141 \\ \hline 1 & 2.093 & 2.05 & 2.094 & 2.066 & 2.082 & 2.056 & 2.087 & 2.072 & 2.289 & 2.262 & 2.092 \end{array}$$

Рисунок 2. Результаты расчета

На рисунке 3 представлена соответствующая диаграмма.

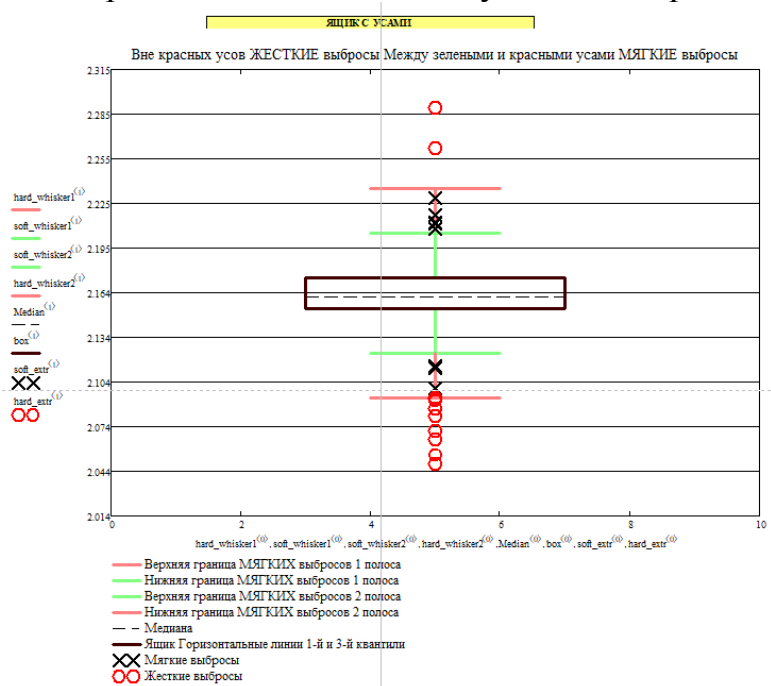


Рисунок 3. Диаграмма с результатами.

**Вывод.**

В среде MATHCAD создан инструментарий, позволяющий в наглядном виде отображать количество и расположение мягких и экстремальных (жестких) выбросов в выборке. Это позволяет исследователю обоснованно принимать решение об исключении соответствующих наблюдений из выборки.

Созданная диаграмма является более наглядной по сравнению с подобной диаграммой в среде EXEL и позволяет решать поставленную задачу без привлечения другой программной среды.

1. Tukey, J.W. Exploratory Data Analysis [Text] / J.W. Tukey. -Addison-Wesley-Reading, MA, 1977.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

**Напрасников В.В.<sup>1</sup>, Бородуля А.В.<sup>1</sup>, Чжан Чжэньбан<sup>1</sup>, Соловьев А  
Н.<sup>2</sup>**

1). Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

2). Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского  
Симферополь, Российская Федерация.

Целью данной работы является сокращение времени проектирования конструкций опор линий электропередач и разработка методики выбора рациональных параметров подобных конструкций.

Для анализа работоспособности конструкции в условиях эксплуатации необходимо решить следующие задачи:

- разработать конечно-элементную модель конструкции,
- провести статический анализ и анализ напряженно-деформированного состояния всей конструкции,
- выполнить модальный анализ,
- выполнить гармонический анализ,
- выполнить поиск оптимальных параметров,
- выполнить проверку устойчивости конструкции при полученных оптимальных параметрах.

При построении модели предварительно была создана ее геометрическая часть с введением параметров, которые в дальнейшем использовались как варьируемые в оптимизационной модели проекта.

Перед выполнением следующего пункта необходимо параметризовать объем и напряжение, которые в дальнейшем будут участвовать в оптимизационной модели. Для этого в дереве решений Model “Geometry” во вкладке “Properties” перед полем “Volume” нажатием по квадратику сделает объем параметрической величиной. Также делается для “Solution” > “Beam Tool” > “Maximum Combined Stress” во вкладке “Results” > “Maximum”. Результат представлен на рисунке 1.

Properties		Results	
<input checked="" type="checkbox"/> Volume	0,88048 m <sup>3</sup>	<input type="checkbox"/> Minimum	-3,5191e+007 Pa
<input type="checkbox"/> Mass	7477, kg	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum	2,215e+007 Pa
Scale Factor Va...	1,	<input type="checkbox"/> Average	6,2346e+005 Pa
		Minimum Occurs On	MiddleConstruction
		Maximum Occurs On	MiddleConstruction

Рисунок 1. Параметризация выходных параметров

После выполнения оптимизационных вычислений с использованием метода Screening отобраны три лучших варианта, значения параметров в которых представлены на рисунке 2.

При этом установлено, что в рациональном варианте объем конструкции составил 1,3947куб.м. против 1,4432куб.м. в исходном варианте.

Table of Schematic F4: Optimization				
	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Minimize P9	Goal, Minimize P9 (Default importance)		
3	P8 <= 8E+06 Pa	Strict Constraint, P8 values less than or equals to 8E+06 Pa (Default importance)		
4	Optimization Method			
5	Screening	The Screening optimization method uses a simple approach based on sampling and sorting. It supports multiple objectives and constraints as well as all types of input parameters. Usually it is used for preliminary design, which may lead you to apply other methods for more refined optimization results.		
6	Configuration	Generate 1000 samples and find 3 candidates.		
7	Status	Converged after 1000 evaluations.		
8	Candidate Points			
9		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
10	P2 - LengthOfBottom (m)	0,15868	0,171	0,1622
11	P3 - WidthOfBottom (m)	0,18238	0,17949	0,19512
12	P4 - WidthOfMiddle (m)	0,11311	0,14246	0,16304
13	P5 - LengthOfMiddle (m)	0,14773	0,12808	0,12149
14	P6 - WidthOfUp (m)	0,039044	0,031289	0,057819
15	P7 - LengthOfUp (m)	0,099614	0,095091	0,095617
16	P8 - Maximum Combined Stress Maximum (Pa)	★★★ 7,7263E+06	★★★ 7,4771E+06	★★★ 7,7444E+06
17	P9 - Geometry Volume (m^3)	— 1,3947	— 1,433	× 1,5108

Рисунок 2. Результаты оптимизации.

Поскольку конструкция изменила свои характеристики, необходимо выполнить дополнительную проверку устойчивости при новых параметрах.

На рисунке 3 слева представлена конечно-элементная расчетная схема с заданными силовыми и кинематическими нагружениями.

Силовые нагружения собирались с учетом обледенения, ветровых нагрузок, веса собственной конструкции и подвешенных проводов. Рассчитанная ветровая нагрузка округленно равна 5000Н и прикладывается к каждой из четырёх точек, в направлении оси ОУ.

Полученный запас по устойчивости при потере устойчивости по первой форме составляет боле 10, что подтверждает приемлемость выбираемого рационального варианта конструкции.

### B: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

12.02.2026 13:43

**A** Standard Earth Gravity: 9,8066 m/s<sup>2</sup>

**B** Fixed Support

**C** Force: 20000 N

**D** Travers. 4

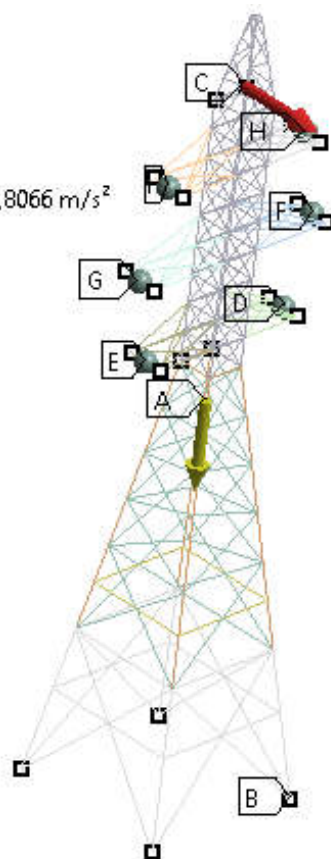
**E** Travers. 1

**F** Travers. 3

**G** Travers. 6

**H** Travers. 2

**I** Travers. 5



### C: Eigenvalue Buckling

Total Deformation

Type: Total Deformation

Load Multiplier (Linear): -13,727

Unit: m

12.02.2026 13:40

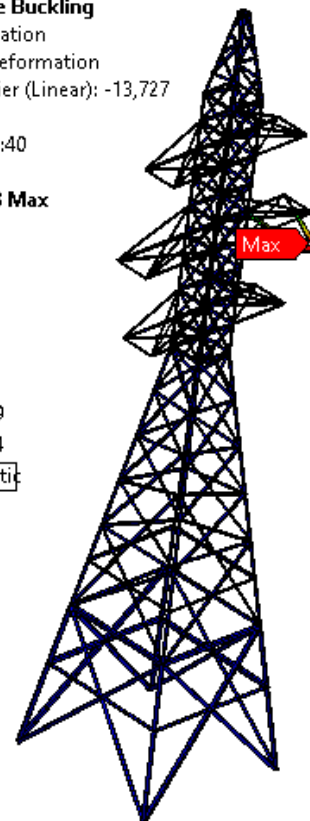
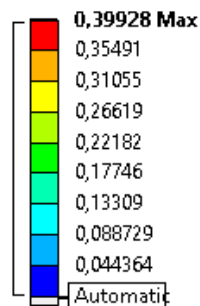


Рисунок 3. Расчетная конечно-элементная схема (слева) и первая форма потери устойчивости (справа)

### Вывод.

В результате выполнения работы разработана конечно-элементная модель конструкции, проведен статический анализ и анализ напряженно-деформированного состояния всей конструкции, выполнен модальный анализ, выполнен гармонический анализ, найдены оптимальные параметры в соответствии с формулировкой оптимизационной задачи, при этом установлено, что в рациональном варианте объем конструкции составил 1,3947куб.м. против 1,4432куб.м. в исходном варианте, проверена устойчивость конструкции при полученных оптимальных параметрах.

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОЙ СТОЙКИ ПРИ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКЕ

Напрасников В.В.<sup>1</sup>, Жэнь И<sup>1</sup>, Бородуля А.В.<sup>1</sup>, Соловьев А.Н.<sup>2</sup>

1) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

2) Крымский федеральный университет  
Симферополь, Российская Федерация.

Целью данной работы является проверка прочности элемента опорного блока нефтедобывающей платформы в процессе и по окончании ремонта. Конструкция моделируется как трехмерная цилиндрическая колонна кусочно-постоянной толщины, консольно закрепленная в верхней и нижней частях. Колонна высотой 20 м погружена под воду на глубину 20 м (по ее нижнему краю). Диаметр колонны 2 м.

Моделирование нагрузки осуществлено приложением гидростатического давления и действием волновой нагрузки. С достаточной точностью можно считать, что погружение в море на каждые 10 метров дает увеличение гидростатического давления на одну атмосферу. Поэтому на глубине 20 м колонна испытывает давление равное 3 атм, то есть  $303975 \text{ Па} (\text{Н/м}^2)$  (1 атмосфера =  $101325 \text{ Па}$ ). Гидростатическое давление прикладывалось на фронтальную и тыльную стороны трубы относительно отверстия и накладки.

Вид частей при монтаже накладки представлен на рисунке 1.

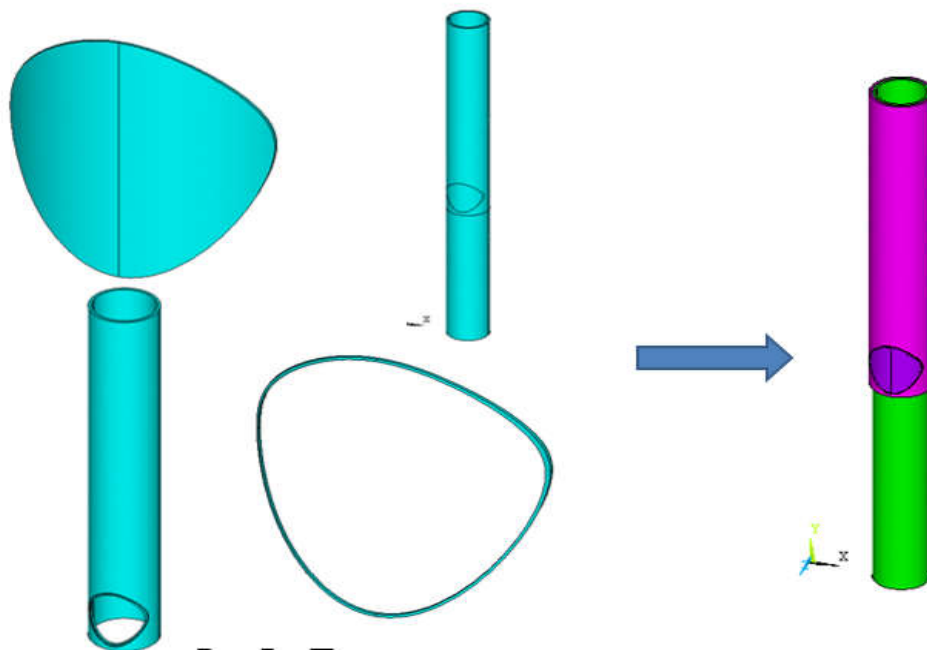


Рисунок 1. Вид частей

Для задания волновой нагрузки на колонну использовалось уравнение Морисона

$$F = \rho * C_m * \pi / 4 * D^2 * a + 1/2 * \rho * C_d * D * u * |u|,$$

$\rho = 1025$  кг/м<sup>3</sup> – плотность морской воды,

$D = 2$  м – диаметр трубы,

$C_m = 1,2$  – коэффициент инерции,

$C_d = 1,05$  – коэффициент гидродинамического сопротивления,

$a = -A_w 2 \cos(kx - wt)$  - ускорение,

$u = A_w \sin(kx - wt)$  – скорость волны,

Период волны  $T = 14$  с.

Перемещение точки на накладке по оси, перпендикулярной оси колонны, за 4 секунды с шагом 0,1с представлено на рисунке 2.

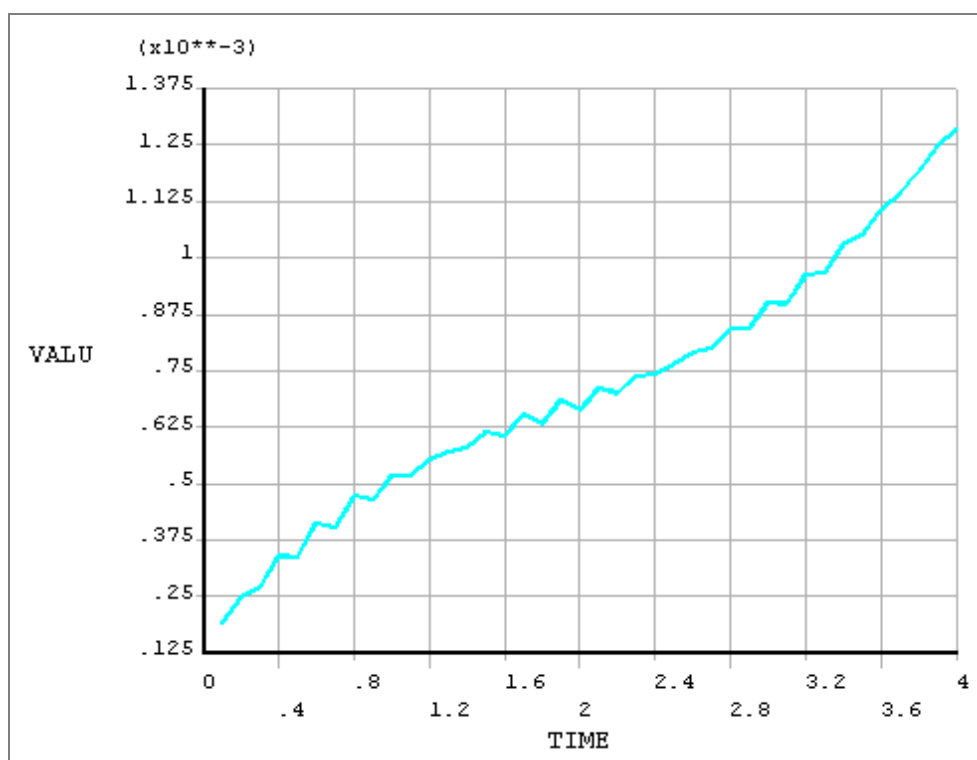


Рисунок 2. Перемещение в разные моменты времени

Максимальные напряжения по Мизесу при приложении волновой нагрузки в разные моменты времени представлены на рисунке 3.

При расчете модели колонны с вырезанным дефектом и с накладкой и получили следующие результаты:

Колонна с накладкой:

- максимальное перемещение равно 0,0018974м,
- максимальное напряжение по Мизесу 0,348e8 Па
- Колонна без накладки:
- максимальное перемещение равно 0,001893м,
- максимальное напряжение по Мизесу 0,342e8 Па.

Перемещение в модели без накладки больше на 0,000019м, что незначительно.

Напряжение же в модели без накладки меньше на 0,006е8 Па. В обоих случаях возникшее максимальное напряжение меньше допустимого напряжения в материале (5.4е8 Па).

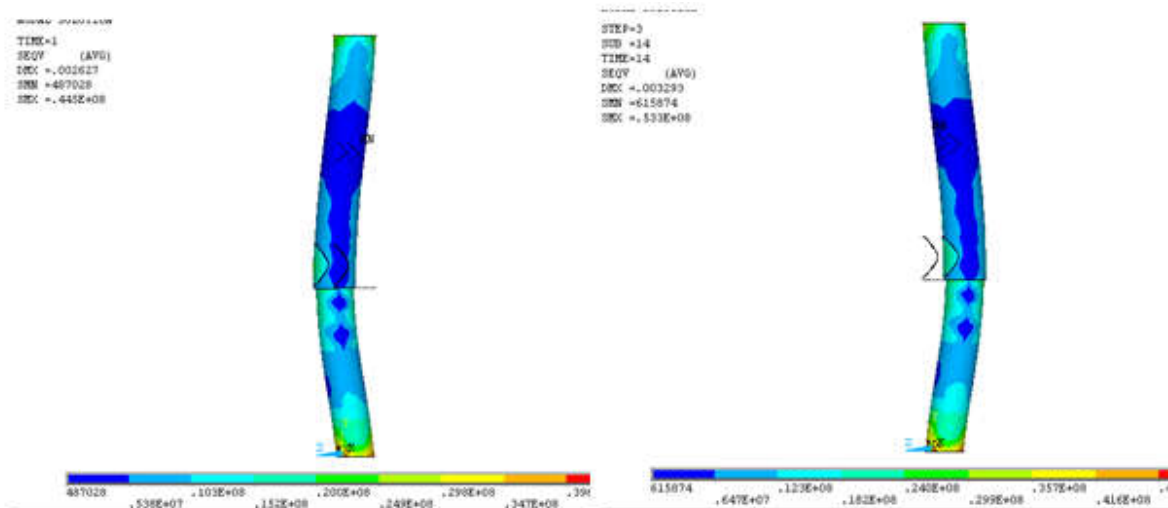


Рисунок 3. Начальный момент (слева) и момент конца первого периода волны (справа)

Картинки напряжений на разных частях конструкции представлены на рисунке 4.

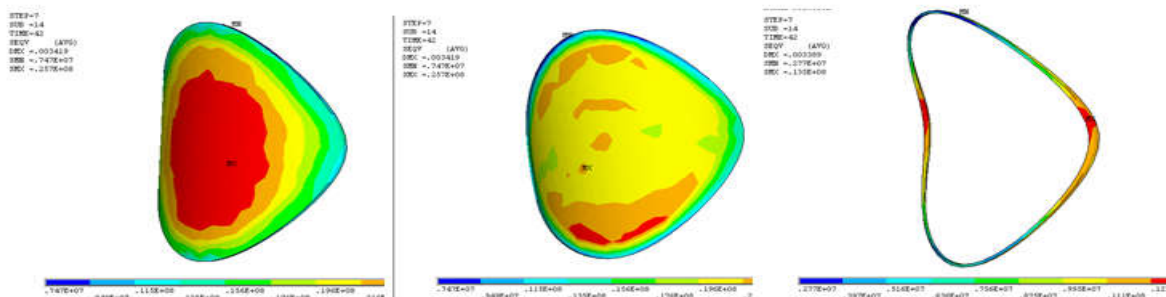


Рисунок 4. На накладке (слева), задняя поверхность (в центре), на сварном шве (справа)

Вывод.

В результате выполнения работы создана параметрическая модель опорной стойки и на ее основе проведено исследование напряженно-деформированного состояния конструкции.

Время анализа 42 секунды, что соответствует трем периодам волны.

Максимальное напряжение по Мизесу (0.581е8 Па), возникшее в конструкции в месте закрепления за все время анализа, меньше допустимого напряжения в этом материале (5.4е8 Па).

Максимальное перемещение модели в области накладки (0.00361м) можно принять допустимым.

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Напрасников В.В.<sup>1</sup>, Чжан Чжэньбан<sup>1</sup>, Бородуля А.В.<sup>1</sup>, Соловьев А.  
Н.<sup>2</sup>

- 1). Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;
- 2). Крымский федеральный университет  
Симферополь, Российская Федерация.

Целью данной работы является подготовка оптимизационной модели опоры линии электропередач, на основе которой предполагается выполнять поиск рационального варианта конструкции.

Для вариантного анализа конструкции при эксплуатационных нагрузках необходимо решить следующие задачи:

- создать параметрическую геометрическую модель конструкции и назначить параметры проекта,
- подготовить конечно-элементную модель конструкции предварительно выполнив сбор реальных нагрузок с учетом воздействий ветра и обледенения,
- провести статический анализ и анализ напряженно-деформированного состояния всей конструкции и сравнить полученные результаты с допустимыми значениями.

Пример опоры и созданная конечно-элементная схема представлены на рисунке 1.

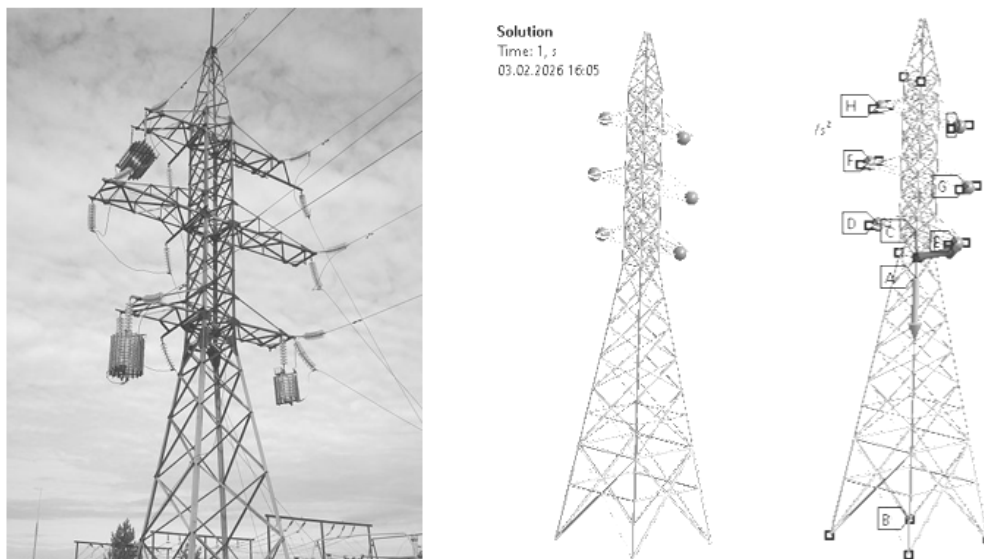


Рисунок 1. Пример опоры и конечно-элементная схема

Следующим шагом является формулировка оптимизационной модели. При этом необходимо указать критерии и функциональные ограничения.

Важным этапом является исследование чувствительности критериев и ограничений по отношению к изменению варьируемых параметров проекта.

При большом количестве варьируемых параметров существенно возрастает суммарное время выполнения оптимизационных вычислений, поэтому на основе анализа чувствительности следует по возможности сократить количество варьируемых параметров проекта, участвующих в этих вычислениях.

Результаты анализа чувствительности объема материала конструкции и максимума комбинированного напряжения в конструкции от шести варьируемых параметров представлены на рисунке 2.

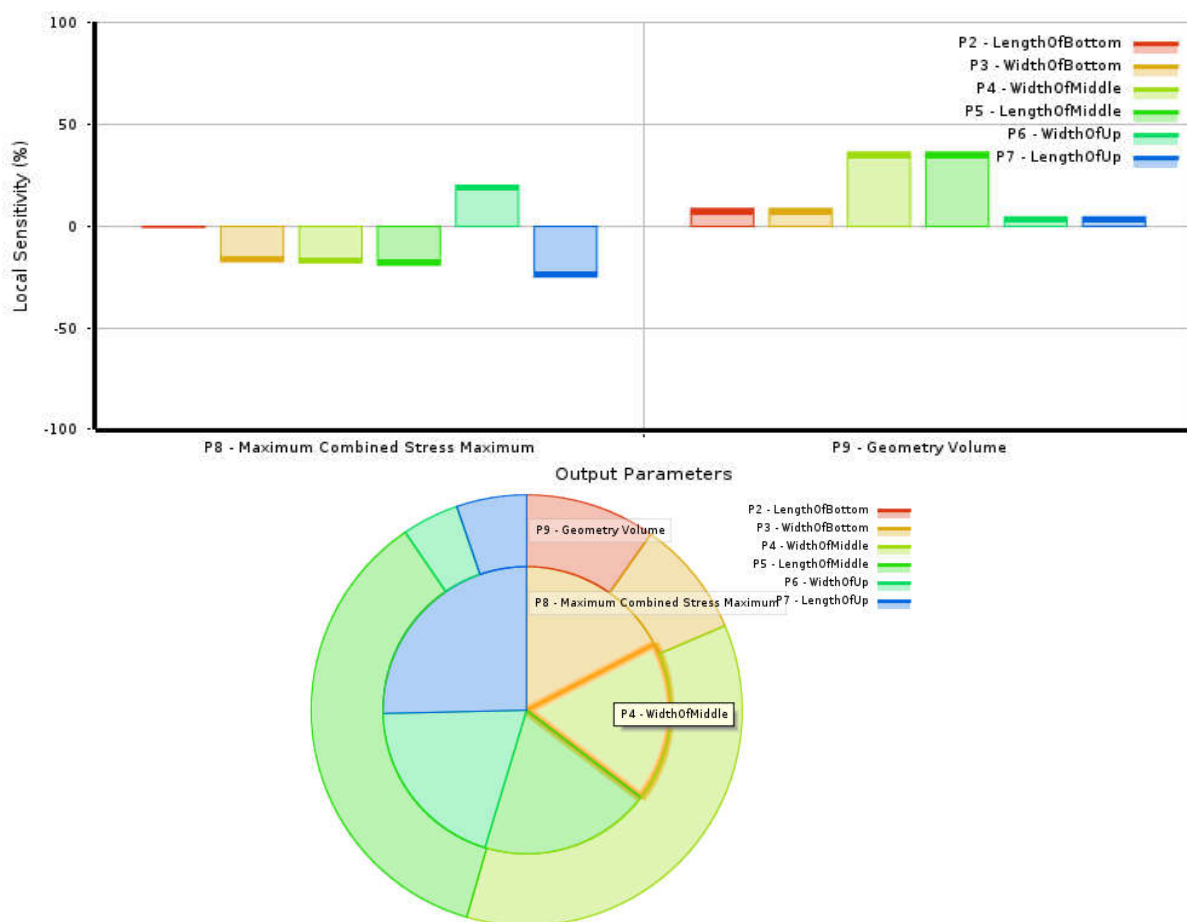


Рисунок 2. Результаты анализа чувствительности и в виде Bar (вверху) в виде Pie (внизу)

#### Вывод.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что параметры P2 – LengthOfBottom и P3 – WidthOfBottom оказывают незначительное влияние на выходные параметры P8 - Maximum Combined Stress Maximum и P9 - Geometry Volume. Их можно не учитывать при выполнении оптимизационных расчетов.

## РАСПОЛОЖЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ НА МТФ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ КРС

Немирович С.И.

УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет»

Минск, Республика Беларусь

Животноводство является важнейшей отраслью любого государства, но несмотря на это квалифицированных специалистов в сельском хозяйстве уменьшится из-за сложности работы и других факторов. Поэтому приходится разрабатывать и внедрять автоматические системы контроля и учета. В молочном скотоводстве имеется проблема контроля массы животных, так как большинство действующих ферм требуют модернизации или изменения технологического процесса для ежесуточного контроля массы. Имеющиеся системы имеют свои недостатки. К примеру, недостатком доильного робота с встроенными весами является то, что не каждая ферма может себе позволить его из-за стоимости, которая в разы выше, чем у аналогичных способов доения и измерения массы. Высокая стоимость обслуживания и ремонта делает его экономически неинтересным для доильных ферм.[1] Поэтому разрабатываются системы дистанционного измерения и контроля живой массы животных, которые основываются на получении оптического изображения, по которым высчитываются геометрические параметры. Чтобы параметры были неизменны и точны, необходимо определиться с расположением оборудования на МТФ. Доильные залы в зависимости от конструкции бывают "Тандем", "Елочка", "Параллель" и "Карусель". Доильные залы широко распространены и обладают высокой производительностью труда.[2] Камеры необходимо размещать так, чтобы можно было получить четкое изображение животного без обрезанных частей на снимке. Если необходима повышенная точность определения геометрических размеров животного, нужно ставить две или три камеры с разных ракурсов: сбоку, сверху и сзади. Рис.1.



Рисунок 1 - Расположение камер для получения геометрических параметров животного.

В зависимости от камеры и фокусного расстояния, рекомендуемое расстояние от 2 до 4 метров. Более точную настройку лучше проводить на месте установки.[3] Поэтому штативы камер необходимо устанавливать регулируемые и предусмотреть защиту оборудования от воздействия агрессивных факторов, также ограничить доступ животных к оборудованию. Для расположения камер необходимо найти места или организовать их, где животные проходят по одному, и установить там камеры. Рис.2.

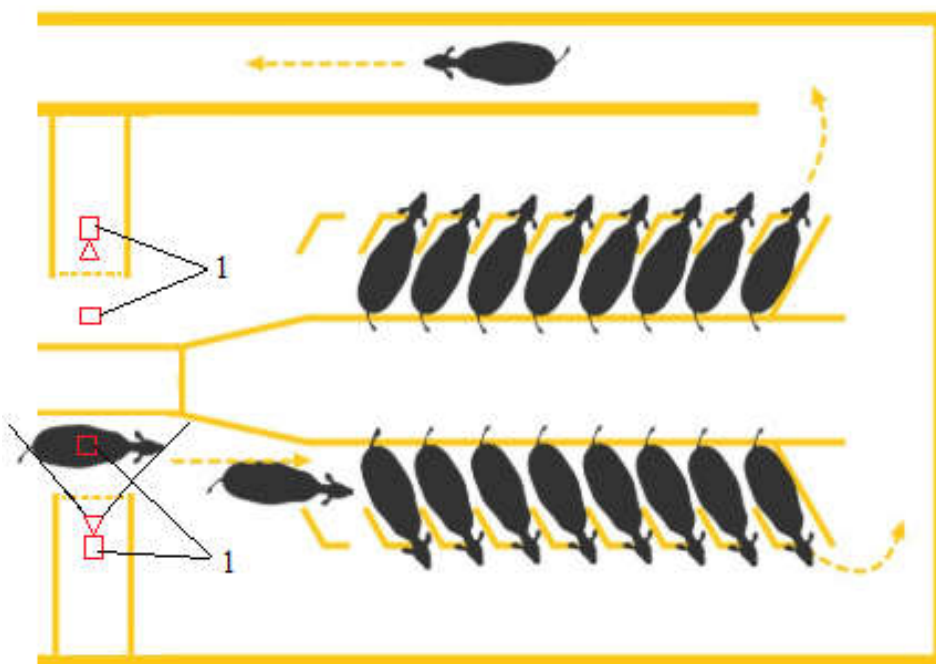


Рисунок 2 - Расположение камер (1) для дистанционного измерения массы в доильном зале "Елочка".

Дистанционный контроль массы позволяет не только освободить от ежемесячного контроля работников, но и не вызывает стресс у животных, из-за которого может теряться до 10% живой массы животного. Можно организовать сбор данных по каждому животному с занесением в базу и выявлять изменение массы животного. При резком изменении массы вызвать ветеринара на обследование. В свою очередь, зная массу животного, можно более точно дозировать мед. препараты при лечении.

1. Немирович С.И. Способы и методы взвешивания КРС в АПК // Агротехника и энергообеспечение. - 2022. - №4. - С. 219-226.

2. Машины и технологии в молочном животноводстве: учеб. пособие /В. Ю. Фролов [и др.]. –Краснодар, 2013. – 388 с.

3. Немирович С.И. Рекомендации к оптико-электронной системе для бесконтактной оценки массы КРС/ С.И. Немирович, И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков// Материалы 14-й МНПК «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии», Иркутский ГАУ, 24-25 апреля 2025.- с. 417-421.

## МЕТОД СИНТЕЗА УСТОЙЧИВЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**Несенчук А.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Рассматриваются динамические системы с возмущенными параметрами, описываемые семействами характеристических полиномов третьего порядка с коэффициентами в пределах заданных интервалов значений:

$$g_n(s) = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n, \quad -\infty < a_j < +\infty, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

$$\text{где } n = 3, a_j \in \mathbb{R}, a_j \in (\underline{a}_j, \bar{a}_j).$$

На базе выявленных особенностей конфигурации корневых портретов подобных систем и графоаналитического подхода к их анализу и синтезу [1] предлагается метод расчета параметров (коэффициентов) характеристического уравнения системы, обеспечивающих ее робастную устойчивость в случае неустойчивости исходной интервальной динамической системы.

Запишем уравнение свободного корневого годографа полинома (1) [1]:

$$3\sigma^2\omega - \omega^3 + 2a_1\sigma\omega + a_2\omega = v(\sigma, \omega) = 0, \quad (2)$$

и уравнение параметра для полинома (1) [1]:

$$-\sigma^3 + 3\sigma\omega^2 - a_1\sigma^2 + a_1\omega^2 - a_2\sigma = u(\sigma, \omega) = a_3, \quad (3)$$

уравнение миграции корней на границе устойчивости:

$$\omega^3 - a_2\omega = 0 \quad (4)$$

и функцию параметра на границе устойчивости в виде

$$a_1\omega^2 = a_3. \quad (5)$$

Корневой портрет системы  $P$  опишем в форме бесконечного множества двухпараметрических полей  $F_i$  корневых траекторий [1]:

$$P = \{F_i\}, i = 1, 2, \dots (6)$$

*Определение 1.* Область  $C$  на границе устойчивости  $i\omega$ , где корневой портрет/поле корневых траекторий пересекает эту границу, назовем *областью пересечений (портрета/поля)* ( $C = [c_1, c_m]$  на рис. 1).

*Определение 2.* Доминирующим полем в семействе полей корневых траекторий (6) назовем поле  $F_i = F_d$ , при расположении которого в левой полуплоскости  $s$  корней весь корневой портрет системы располагается в левой полуплоскости.

*Определение 3.* Корневой годограф  $h_i = h_d$  доминирующего поля  $F_d$  корневых траекторий полинома (1), устойчивость которого гарантирует

устойчивость поля  $F_d$ , назовем *доминирующим корневым годографом поля/портрета*.

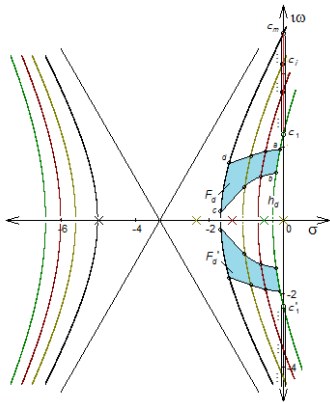


Рис. 1 – Поле корневых траекторий полинома  $s^3 + 10s^2 + a_2s + a_3 = p(s)$  при  $a_2 \in [5,25]$ ,  $a_3 \in [18,40]$ ,  $a_1 \in [10,20]$

На основании выражений (2) – (6) сформулируем следующие утверждения.

*Утверждение 1.* Доминирующим в семействе полей корневых траекторий полинома (1) является поле  $F_d$ , которое содержит линию уровня (доминирующий корневой годограф  $h_d(s)$ ), проходящую через нижнюю точку  $c_1$  области пересечений  $C$  (рис. 1), в которой значение параметра  $a_3$  является минимальным для данного семейства:  $a_3 = \min a_3(c_1)$ .

*Утверждение 2.* Доминирующий корневой годограф  $h_d(s)$  полиномиального семейства (1) описывается уравнением

$$s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = h_d(s) \quad (7)$$

и доминирующий полином, устойчивость которого гарантирует устойчивость (7) уравнением  $s^3 + a_1s^2 + a_2s + \bar{a}_3 = p_d(s)$ . (8)

На основании (7) и (8) функцию доминирующего поля  $F_d$  корневых траекторий определим выражением

$$f_d(\sigma, \omega) = \omega^2 - 3\sigma^2 - 2a_1\sigma \quad (9)$$

и уравнение линий уровня поля  $F_d$  выражением

$$\omega^2 - 3\sigma^2 - 2a_1\sigma = a_2. \quad (10)$$

*Условие устойчивости.* Семейство характеристических полиномов (1) динамической системы с интервально неопределенными коэффициентами является асимптотически устойчивым, если доминирующее поле  $F_d$  (9) системы (доминирующий корневой годограф  $h_d$  системы) располагается в левой полуплоскости корней  $s$ .

Расчет и настройка параметров (синтез) семейства (1), согласно данному методу, выполняется, как правило, посредством определения (настройки) значений параметров  $a_2$  и  $a_3$ . Настройка осуществляется на основании утверждений 1 и 2 в соответствии со следующими условиями:

$$0 < a_3 < \min(a_3(c_i)), a_2(c_m) < a_2 < a_2(c_i),$$

где  $a_3(c_i)$ ,  $a_2(c_i)$  – соответственно значения коэффициентов  $a_3$  и  $a_2$  в определенной точке  $c_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , пересечения границы устойчивости  $i$ -й линией уровня доминирующего поля  $F_d$  (рис. 1).

Точка  $c_i$  может выбираться произвольно, по желанию пользователя. В случае необходимости выполняется также настройка параметра  $a_3$ .

1. Nesenчук А. А. Investigation and Synthesis of Robust Polynomials in Uncertainty on the Basis of the Root Locus Theory / А. А. Nesenчук // Polynomials – Theory and Applications / А. А. Nesenчук; ed. by Cheon Seoung Ryoo. – London, 2019. – Ch. 6. – P. 109–130.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Нитиевский С.А.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Процесс проектирования современных электроприводов сопряжен с необходимостью решения множества технических задач, одной из которых является выбор электродвигателя с максимальной возможностью эффективного использования в тепловом отношении, что особенно актуально для установок, для которых требования к массогабаритным показателям электропривода являются крайне критичными. В этой связи возникает необходимость моделирования тепловых состояний электродвигателя, при этом в зависимости от номинального режима работы электропривода методики расчета, моделирования и анализа тепловых состояний могут существенно различаться.

К примеру, при проектировании системы электропривода на основе бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) в некоторых случаях может быть целесообразно конструирование такого двигателя на основе серийного асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Методика такого конструирования подробно изложена в [1], и продолжает в некоторых случаях оставаться безальтернативной даже несмотря на гигантский скачок в развитии производства двигателей на постоянных магнитах. В этом случае проверить правильность принятых технических решений можно в том числе с помощью решения задачи стационарной теплопередачи методом конечных элементов с помощью ЭВМ.

Ниже на рисунках приведены результаты теплового моделирования двух БДПТ мощностью 1,5 кВт, сконструированных на основе серийных самовентилируемых АД. При этом в данном примере в том числе сравниваются возможные конструкции БДПТ с возбуждением от двух типов магнитов: на основе сплава неодим-железо-бор (NdFeB) и ферритов. Задача стационарной теплопередачи в данном случае решается методом конечных элементов с помощью программы ELCUT. Основой для анализа служат геометрические параметры поперечного сечения статора двигателя-прототипа. Ротор с магнитами в данном случае изображен в упрощенном виде. Геометрия поверхности охлаждения также упрощена.

В результате моделирования получены следующие значения температур установившегося режима: для БДПТ с возбуждением от магнитов на основе сплава NdFeB (рисунок 1, слева) температура обмотки  $T_{обм}=103^{\circ}\text{C}$  (376 К), температура магнита  $T_{магн}=95^{\circ}\text{C}$  (368 К); для БДПТ с возбуждением от магнитов на основе ферритов (рисунок 1, справа) температура обмотки  $T_{обм}=138^{\circ}\text{C}$  (411 К), температура магнита

$T_{\text{магн}}=124^{\circ}\text{C}$  (397 К). Отличия в цветовых оттенках градиентов обусловлены настройками легенды программы.

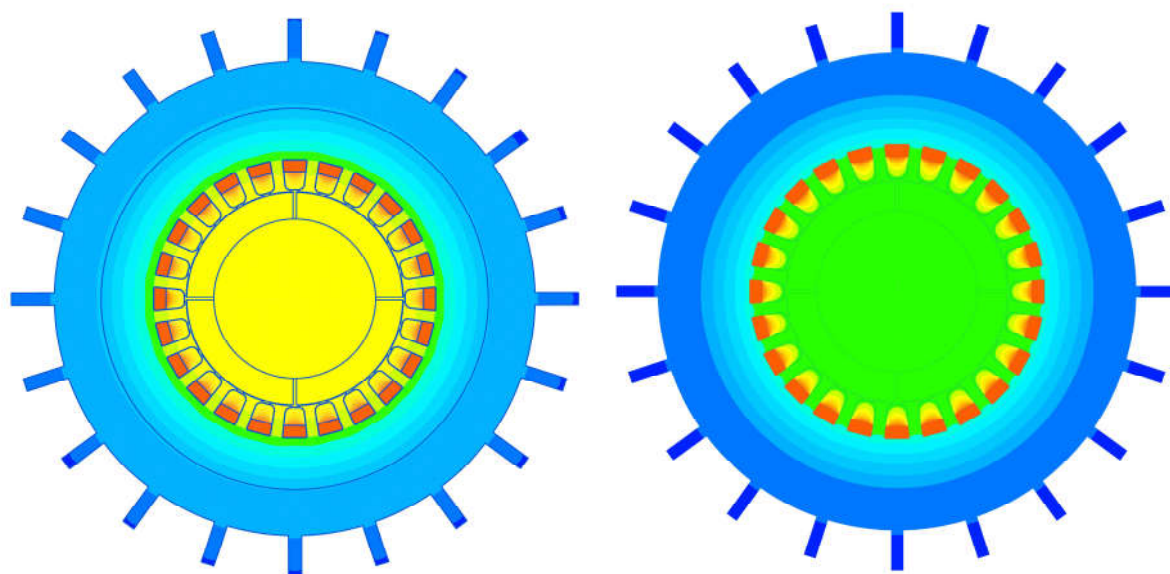


Рисунок 1 – Результаты теплового моделирования БДПТ

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что БДПТ на основе неодимовых магнитов имеет удовлетворительные показатели по нагреву. Полученные значения температур установившегося режима свидетельствуют о том, что тепловая нагрузка на обмотки статора и постоянные магниты находится в допустимых пределах, следовательно, значения превышений температур частей двигателя не выйдут за допустимые пределы. В то же время БДПТ на основе ферритовых магнитов имеет худшие температурные показатели. Полученное значение температуры для обмотки статора практически равно максимально допустимой температуре для класса изоляции В ( $140^{\circ}\text{C}$ ), применяемой в обмоточных проводах. Температура нагрева постоянного магнита также превышает допустимые пределы ( $100\text{-}110^{\circ}\text{C}$ ). Следовательно, при данных параметрах существенное снижение тепловой нагрузки без изменения геометрии статора возможно лишь с помощью увеличения мощности двигателя на одну ступень.

Следует отметить, что решение задачи стационарной теплопередачи в основном является актуальным для электроприводов, работающих в продолжительном режиме S1. Для электроприводов с режимами работы, в которых преобладает динамика, необходимо обязательно рассчитывать переходные процессы и учитывать их влияние на тепловое состояние машины.

1. Фираго, Б. И. Реализация бесконтактного двигателя постоянного тока с ферритовыми магнитами на основе конструкции асинхронного двигателя / Б. И. Фираго, А. Г. Гульков, Л. Павлячик // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2001. – № 1. – С. 39-51.

## АДАПТИВНОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Опейко О.Ф.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

Автоматизация синтеза управления, выполняемого в режиме реального времени, возможна, в частности, с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [1]. В условиях многоуровневой системы разделение задач управления между уровнями таково, что на разных уровнях иерархии задачи управления качественно различны.

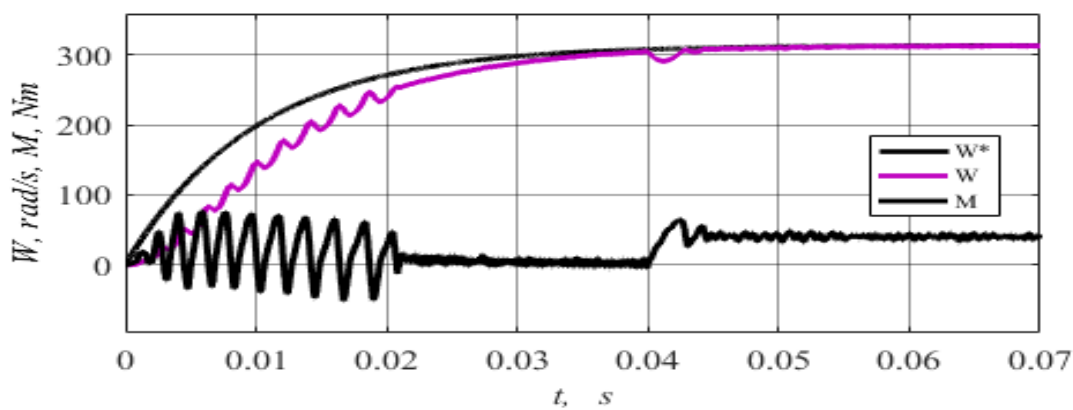
Неопределенность динамических свойств объекта управления вызвана рядом причин и побуждает искать методы робастного управления, и, в частности, методы, свободные от математической модели объекта [2] – [4]. Проблема робастного управления особенно выражена на нижнем уровне иерархии системы. От управления на нижних уровнях, а это обычно электроприводы, требуется быстрота реакции.

Обычно время, отводимое в электроприводе на расчет сигнала управления  $u(k)$  на  $k$ -м шаге, ограничено периодом  $T_c$  широтно-импульсной модуляции в преобразователе электрической энергии, от которого получает напряжение электродвигатель. В работах [2], [3] предлагается для определения параметров управления электроприводом использовать методы обучения, свойственные ИНС и одна из трудностей — это ограничение, накладываемое на время расчета управления. Время расчета значительно сократится, если использовать известные из теории автоматического управления закономерности для создания начальных условий и критерия качества, например, как в [4]., где критерий качества принят в виде

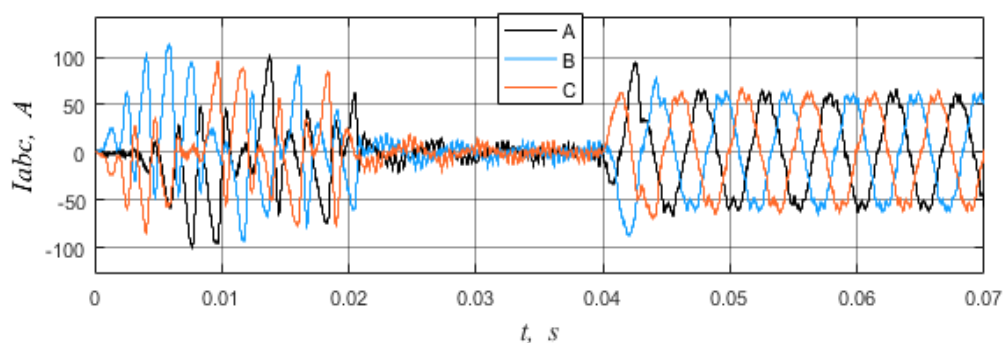
$$Q = T_c \sum_{k=1}^{\infty} (u(k)^2 + \lambda T_c^{-2} (\Delta u(k))^2) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь постоянный коэффициент  $\lambda$  определяет интенсивность адаптации. Применение метода синтеза [4] для векторного управления скоростью синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) выполняется в предположении, что контур управления током является безынерционным звеном.

Результат имитационного моделирования системы для СДПМ мощностью 8,4 КВ с 4-мя парами полюсов показан на рисунке 1. Адаптация начинает действовать при  $t > 0.02$  s, а при  $t = 0.04$  s к двигателю приложен момент нагрузки. Эффективность адаптации на рисунке 1, а проявляется в затухании колебаний, а на рисунке 1, б – в улучшении гармонического состава тока трех фаз статора.



*a*



*б*

Рисунок 1 – Скорость и момент в процессе разгона СДПМ (*a*), изменение тока в фазах статора (*б*)

Преимущество метода [4] заключается в сравнительной простоте расчета сигнала управления скоростью, что позволяет уложиться в отведенный для формирования управления интервал времени.

1. Aggarwal C.C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook / (eBook) Library of Congress Control Number: 2018947636 Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. - 497 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0>.

2. Neural Speed Controller Trained Online by Means of Modified RPROP Algorithm / T. Pajchrowski, K. Zawirski, K. Nowopolski / IEEE Transactions on Industrial Informatics, V. 11, NO. 2, April 2015. P. 560- 568. DOI: 10.1109/TII.2014.2359620.

3. Transferring Online Reinforcement Learning for Electric Motor Control from Simulation to Real-World Experiments / G. Book, A. Traue, P. Balakrishna, A. Brosch, M. Schenke, S. Hanke, W. Kirchgässner, O. Wallscheid / IEEE Open Journal of Power Electronics, V. 2, 2021. P. 187-201. DOI: 10.1109/OJPEL.2021.3065877.

4. Опейко О.Ф. Синтез дискретного адаптивного управления с ПИД-регулятором // Системный анализ и прикладная информатика. 2025.№4. С.36-40. DOI: 10.21122/2309-4923-2025-4-36-40.

## СТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА ZN-AL

Орда Д.В., Сосновский И.А., Комаров А.И., Курилёнок А.А.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработана технология нанесения покрытий на внутреннюю поверхность стальных деталей методом центробежного формования шихты в условиях индукционного нагрева [1-3]. В процессе наплавки происходит полное расплавление шихтового материала с образованием единого расплава, что позволяет наносить сплав необходимого состава и (или) проводить его модифицирование непосредственно в процессе наплавки, при этом структура покрытия формируется под действием центробежных сил.

*Металлографический анализ образцов покрытия из сплава ЦАМ10-2, модифицированного нанонаполнителем TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, показал, что наплавленный слой имеет композиционное строение (рисунок 1): цинк-алюминиевый сплав армированный железосодержащими интерметаллидными включениями. У стальной основы находится сплав, насыщенный цинком, состав которого изменяется к поверхности, увеличивается доля алюминия. Железосодержащие включения (Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>) имеют глобулярную форму диаметром до 30 мкм.*



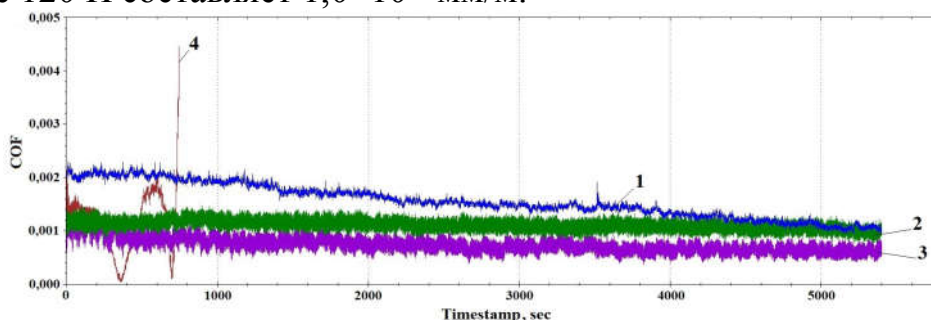
Рисунок 1 – Структура покрытия из сплава ЦАМ10-2 модифицированного нанонаполнителем TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На поверхности стальной втулки формируется диффузионный цинковый слой толщина которого местами достигает 300 мкм. Структура слоя представляет гетерогенное строение: у стальной основы до 10 мкм прослойка, содержащая 20-25 масс.% Zn; 10-50 мкм зона столбчатых зерен Fe - Zn (23-26%), между которыми располагаются зерна Fe (27-34%) - Zn; по мере смещения структура представлена фазой Zn (75-80 масс.%)-Fe с округлыми включениями Fe-Zn (25-30 масс.%). Следует отметить, что формирование структуры покрытия из сплава ЦАМ10-2 модифицированного нанонаполнителем TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> проходит по ранее установленным закономерностям [1, 2].

*Триботехнические испытания образцов втулок проводились после механической обработки поверхностного слоя с учетом ранее проведенных исследований по изучению изменения коэффициента трения по глубине цинковых покрытий [3]. Анализ триботехнических испытаний показал, что*

при нагрузках до 120 Н коэффициент трения (COF) покрытия из модифицированного сплава ЦАМ10-2 находится на уровне 0,001. Испытания при высокой нагрузке 150 Н показали, что коэффициент трения начинает экстремально возрастать, что указывает на наступление критической стадии изнашивания (рисунок 2).

Массовую интенсивность изнашивания в этом случае зафиксировать не получилось ввиду малого изменения массы после испытаний. Тогда как значение линейной интенсивности изнашивания после испытаний при нагрузке 120 Н составляет  $1,0 \times 10^{-6}$  мм/м.



1 – 30 Н; 2 – 60 Н; 3 – 120 Н; 4 – 150 Н

Рисунок 2 – График изменения коэффициента трения покрытия из сплава ЦАМ10-2 модифицированного нанонаполнителем  $TiC-Al_2O_3$  в процессе испытаний при различной нагрузке

Из полученных результатов можно установить, что модифицирование сплава ЦАМ10-2 нанонаполнителем  $TiC-Al_2O_3$  не только способствует снижению коэффициента трения, но и повышению нагрузочной способности материала. При этом эффект модифицирования сохраняется и после формирования покрытия методом центробежной индукционной наплавки, позволяя использовать данные покрытия как альтернатива бронзовым.

1. Структура и свойства легированных покрытий из сплава  $ZnAl30$ , полученных методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2022. – Вып. 11. – С. 299–305.

2. Анализ структуры и триботехнических свойств легированных покрытий на основе сплава системы  $Zn-Al$ , полученных методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 12. – С. 340–345.

3. Структура и трибомеханические свойства градиентного покрытия  $ZnAl30$  / А.И. Комаров и [др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2024. – Вып. 13. – С. 275–281.

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ С КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ СВЯЗКОЙ И ДОБАВКАМИ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Парницкий А.М.<sup>1</sup>, Мельник Ю.А.<sup>2</sup>

- 1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь;
- 2) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

Физико-механические свойства сверхтвердых композитов на основе алмаза определяются фазовым составом, дисперсностью порошков и характером межзеренного взаимодействия. Эффективное спекание таких материалов требует не только высоких давлений, но и обеспечения прочной адгезии между зернами. Как показано ранее [1], смачивание алмаза происходит при образовании карбидов, поэтому использование карбидообразующих элементов является эффективным способом повышения прочности алмазных поликристаллов.

Известно, что микротвердость и трещиностойкость сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора (КНБ) с мультимодальной структурой выше на 30–40%, чем у материалов, спеченных из микропорошков КНБ одной зернистости. Повышенные прочностные характеристики разрабатываемого поликристаллического сверхтвердого алмазного материала при достижении высокой пластичности также могут быть реализованы за счет формирования в нем гетерогенной структуры. При этом структурной основой такого композиционного материала являются микрoзернистые порошки алмаза (или смеси алмаза и КНБ).

В связи с этим целью работы является установление закономерностей структурообразования и моделирование процесса получения поликристаллического сверхтвердого материала на основе модифицированного алмазного микропорошка и микропорошка КНБ.

В работе использованы микропорошок алмаза АСМ 14/10 (0,5–20 мкм), модифицированный кремнием, и микропорошок кубического нитрида бора (5–7 мкм). Модифицирование проводили химико-термической обработкой в атмосфере диссоциированного аммиака при 800–950 °С. Механизм включает хлорирование модифицирующего элемента, его транспорт к поверхности алмаза, адсорбцию и последующее карбидообразование с формированием поверхностной пленки [2]. Последующее термобарическое спекание композита состава АСМ(Si)+КНБ проводилось при следующих режимах:  $T = 2000$  оС,  $P = 5,5$  ГПа,  $t = 15$  с.

Модель формирования поликристаллического композиционного сверхтвердого материала состава «модифицированный кремнием микропорошок алмаза + кубический нитрид бора» (АСМ(Si)+КНБ) может

быть рассмотрена исходя из этапов технологии, представленной на рисунке 1.

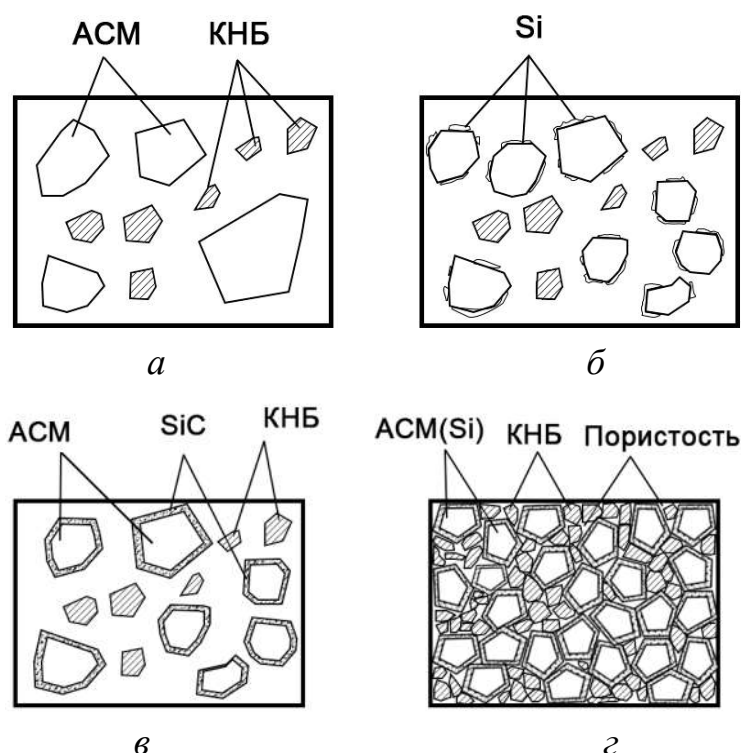


Рисунок 1 – Стадийность процесса формирования структуры композита состава ACM(Si)+КНБ: а – исходные порошки ACM и КНБ; б – химико-термическое модифицирование алмаза карбидом кремния; в – формирование пленки SiC на поверхности алмаза; г – спеченный материал состава ACM(Si)+КНБ

Формирование жесткого пространственного каркаса из зерен алмаза и кубического нитрида бора в сочетании с непрерывной матрицей карбида кремния обеспечивает высокую когезионную прочность композита. Такое строение материала позволяет достичь одновременного повышения твердости и вязкости разрушения.

1. Ковалевский, В.Н. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния / В. Н. Ковалевский, С. К. Гордеев, С. Б. Корчагина, И. В. Фомихина, А. Е. Жук // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 5 – С. 8–14.

2. Витязь, П.А. Структурные особенности алмазных порошков после поверхностного модифицирования активаторами спекания / П.А. Витязь, В.Т. Сеньюк, В.И. Жорник, А.М. Парницкий, Т.В. Гамзелева Т. В. // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – № 1 (30). – С. 62–73.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АСУ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ТУРКМЕНИСТАНЕ

**Пенджиев А., Бекмурзаев Б.**

Туркменский государственный архитектурно-строительного  
института, Ашхабад, Туркменистан

*Актуальность.* Уличное освещение является одним из основных потребителей электроэнергии, поэтому энергоэффективное управление является одной из актуальных задач энергетиков.

*Современное состояние* уличное освещение сталкивается с проблемами высоких затрат электроэнергии, преждевременного износа оборудования и сложностей с оперативным обнаружением неисправностей.

АСУ системы на основе солнечных модулей решают эти задачи, обеспечивая автономное управление включением/выключением света в зависимости от уровня освещенности. Автоматизация позволяет трансформировать освещение из пассивной сети в «умную» систему управления: интеллектуальное управление (фотореле); энергонезависимость (фотомодуль); диагностика и учет (контролировать параметры электроэнергии, диагностировать состояние ламп и оборудования); повышение надежности (мгновенно реагировать на нештатные ситуации).

*Управление уличным* освещением через систему АСУ кардинально отличается от традиционных подходов благодаря возможности индивидуального контроля каждого светильника и реализации сложных адаптивных алгоритмов, учитывающих множественные факторы внешней среды. Астрономические таймеры автоматически корректируют расписание включения и выключения освещения в зависимости от географического положения города и времени года, исключая необходимость ручной настройки при переходе на летнее/зимнее время.

Система учитывает фазы луны, облачность и другие природные факторы, влияющие на естественную освещенность, автоматически адаптируя интенсивность искусственного освещения для поддержания комфортных условий видимости.

*Результаты.* В докладе рассмотрены нормативные документы средней яркости усовершенствованных покрытий улиц, дорог и площадей, дистанционные, телемеханические системы управления в городах Туркменистана. На пример применение GPS-приемника и прибора вычисляющий солнечное сияние (время восхода и захода солнца), в зависимости от географического месторасположения точки координат с ее помощью осветительные приборы включает контроллер, за 15 мин до захода солнца и с наступлением семериков, а так же выключает за 10 мин до рассвета. Использование АСУ в эффективность уличного

освещение и мероприятия для 520 энергетических сетей городского освещения, экономическая эффективность составляет 5263665 кВт·ч в год при этом расход на электроэнергию снизится на 20,6 %, и срок окупаемость составит 2–2,5 года.

*Заключение.* Внедрение АСУ для уличного освещения обеспечивает снижение энергопотребления на 40-70%, сокращение эксплуатационных расходов на 30-50% и окупаемость инвестиций за 2-4 года при одновременном повышении качества световой среды и безопасности городских пространств. Технология превращает каждый светильник в узел умной городской сети, собирающий данные о состоянии окружающей среды и поведенческих паттернах горожан для оптимизации работы всей городской инфраструктуры.

1. Бердымухамедов, Г.М. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018. – 468 с.

2. Бердымухамедов, Г.М. Электроэнергетическая мощь Туркменистана. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2022.– 130 с.

3. Теория автоматического управления. Ч. 1 и 2 / Под ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 2008г. -250с.

4. Козловская, В.Б. Электрическое освещение: Справочник. // В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – Минск.: Техноперспектива, 2015. – 253 с.

5. Пенджиев А.М. Технико-экономическое обоснование организации уличного освещения в сельской местности Туркменистана. Теоретический и научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение», 2022. -№4. С.32-39.

6. Светотехнические параметры и понятия. часть 1. <http://www.osvet.ru/articles/s10/> (дата посещения 19.02.2026)

## **РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ БЫТОВЫХ НЕПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И SCARA-МАНИПУЛЯТОРА**

**Полупанова К. Д.<sup>1</sup>, Морозов С. А.<sup>1</sup>, Матрунчик Ю. Н.<sup>2</sup>, Гриневич А.И.<sup>1</sup>**

1). УО «Национальный Детский Технопарк»,  
Минск, Республика Беларусь

1). Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Рост объема твердых бытовых отходов и низкая эффективность существующих систем сортировки (не более 60-70%) являются одной из острых экологических проблем. Промышленные сортировочные комплексы обладают высокой стоимостью (от \$150 000) и требовательны к инфраструктуре, в то время как DIY-решения имеют крайне ограниченную функциональность. Целью проекта является разработка доступного прототипа интеллектуальной системы для автоматической классификации и сортировки отходов.

Предлагаемая система (Рисунок 1) построена на гибридной архитектуре: одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 отвечает за обработку изображения с веб-камеры с помощью нейросетевой модели, а микроконтроллер Arduino Nano управляет исполнительными механизмами. При попадании объекта на конвейер инфракрасный датчик E18-D80NK инициирует захват кадра. Raspberry Pi, используя модель TensorFlow, обученную на платформе Teachable Machine, классифицирует объект по категориям «пластик», «металл», «стекло», «бумага». Данные о типе отходов передаются на Arduino Nano по UART-интерфейсу. Для физического удаления объекта с конвейера разработан и собран SCARA-манипулятор с тремя степенями свободы (2 вращательных и вертикальная ось), обеспечивающий высокую точность позиционирования при простоте управления. Кинематика манипулятора рассчитана на основе обратных задач.



Рисунок 1 – Прототип роботизированной системы сортировки

В ходе работы были решены задачи анализа аналогов, разработки электрической схемы, 3D-моделирования и сборки манипулятора, а также написания программного обеспечения для всех уровней системы. Тестирование прототипа подтвердило его высокую точность распознавания (до 98%) и надежность срабатывания механизмов, что позволяет эффективно отделять целевые фракции (например, бумагу).

Разработанное решение сочетает преимущества промышленных систем (точность, автоматизация) с гибкостью и экономичностью DIY-подхода. Капитальные затраты на прототип в 5-7 раз ниже промышленных аналогов, что открывает перспективы для масштабирования и использования на небольших предприятиях или в образовательных целях. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию мультиспектрального анализа для более точной идентификации материалов, внедрение IoT-платформы для удаленного мониторинга и перестановка проекта на промышленное оборудование (PLC и сервоприводы).

## **СРАВНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНД РАЗРАБОТЧИКОВ**

**Прихожий А.А., Козловская Ю.Б.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Оптимизационная комбинаторная проблема формирования команд актуальна во многих сферах человеческой деятельности. Аналогичная проблема возникает при комплектации сложных машинных систем, ориентированных на решение различного рода прикладных задач. Безусловно, проблема лежит в плоскости технологий искусственного интеллекта. Вначале, методы формирования команд базировались на математическом программировании, исследовании операций, графовых моделях. В последние годы активно развиваются эволюционные методы, генетические алгоритмы [1 – 3], нейросетевые подходы [4, 5]. В данной работе, с ориентацией на формирование команд разработчиков программного обеспечения, мы анализируем и сравниваем эти методы с целью выявления их достоинств и недостатков, областей предпочтительного применения, направлений дальнейшего развития.

Эволюционный метод формирования команд успешно реализуется генетическими алгоритмами. Базовый генетический алгоритм образует оболочку для последующей конкретизации с целью учета особенностей решаемой задачи. В нем определяются такие концепции как ген, хромосома (индивидуум), функция полезности, генотип, поколение, популяция, генетические операции селекции, скрещивания, мутации. В работах [1, 2], понятие гена и хромосомы конкретизировано под задачу формирования групп разработчиков, при этом обеспечена оптимизация как одной группы, так и нескольких групп одновременно. В работах большое внимание уделено определению функции полезности хромосом, так как именно эта функция показывает способность сформированных групп успешно осуществлять проекты в области информационных технологий. Показано, что функция способна учесть производительность разработчиков, уровень владения языками, технологиями и средствами разработки, наличие экспертов в команде, способность осуществлять парное программирование и коллективную разработку поддерживая интерфейсы друг с другом, учитывать требования проекта по разным параметрам, учитывать влияние размера команды на производительность и многое другое. Важным свойством алгоритмов является то, что они классифицируют все сформированные команды на работоспособные (удовлетворяющие всем предъявляемым к команде требованиям) и неработоспособные (не удовлетворяющие хотя бы одному требованию). Фитнес функция неработоспособных команд зануляется, стимулируя генетический алгоритм строить только работоспособные команды.

Генетические алгоритмы эффективно распараллеливаются. Генетический алгоритм не находит глобальный оптимум, но хорошо справляется с высокой сложностью оценочных функций и большим объемом обрабатываемых данных.

Нейросетевые модели используют обученные представления для формирования команд. Например, вариационная нейросетевая архитектура обучается на данных о навыках, опыте разработчиков, об их совместных работах и публикациях, чтобы автоматически формировать оптимальные команды. Современные исследования демонстрируют эффективность использования искусственных нейронных сетей для формирования высокопроизводительных коллективов разработчиков. Метод позволяет автоматически определять наилучшие комбинации разработчиков исходя из заданных критериев качества, повышая точность подборки команды и снижая риски ошибок. Анализ показывает, что генетические алгоритмы обеспечивают высокую скорость подбора команд и хорошую интерпретируемость решений, однако ограничены масштабируемостью и точностью оценки сложных зависимостей. Напротив, нейросети отличаются высоким уровнем точности и гибкости, позволяя обрабатывать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности, но требуют значительных вычислительных ресурсов, а их результаты работы труднее интерпретируются конечным пользователем.

Таким образом, оба подхода имеют право на существование и применение в реальных проектах цифровой экономики: нейросетевые модели выполняют предварительную оценку и фильтрацию кандидатов, эволюционные алгоритмы выполняют итоговую оптимизацию. Такой гибридный подход может обеспечить высокую эффективность и точность формирования команд разработчиков, адаптированных к динамично меняющимся условиям.

1. Prihozhy A. A., Zhdanouski A. M. Genetic algorithm of optimizing the qualification of programmer teams. *System analysis and applied information science*. – 2020, no. 4, pp. 31–38.

2. Prihozhy A., Zhdanouski A. Genetic algorithm of optimizing the size, staff and number of professional teams of programmers. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems*. – Minsk, BSUIR Publ., 2019, pp. 305–310.

3. Prihozhy A. A. Optimization of programming teams on compatibility of programmers. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2023, no 2 (272), pp. 104–110.

4. A Variational Neural Architecture for Skill-based Team Formation / *ACM Transactions on Information Systems*. – 2024, vol. 42, no. 1, pp. 1-28.

5. V. V. Krasnoproshin and V. V. Matskevich. Random Search in Neural Networks Training. *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2024, vol. 34, no. 2, pp. 309–316.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САД-СИСТЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕРЬЕРА ПОМЕЩЕНИЙ И ЗДАНИЙ**

**Розов Д.В., Дубинин С.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Современные САД-системы (Computer-Aided Design) давно вышли за рамки узкопрофессионального применения и стали доступным инструментом для широкого круга пользователей. Одной из наиболее перспективных областей их использования является проектирование интерьеров помещений и зданий. Данные технологии позволяют решать широкий спектр задач: от простых бытовых, например расстановка мебели в комнате, до сложных процессов создания цифровых двойников крупных архитектурных сооружений.

Существует ряд профессиональных программ для создания интерьеров: Archicad, Planner 5D, SketchUp, 3ds Max и др. Однако большинство этих программ платные и требуют определённых навыков работы с ними. Но зачастую некоторые бытовые задачи, например планирование расстановки мебели в квартире после ремонта, могут быть решены с использованием базовых навыков работы с классическими инженерными САД-системами, которые изучают во многих технических университетах (AutoCAD, SolidWorks, Компас 3D).

Для большинства подобных задач отсутствует необходимость в высокой детализации и создании подробных сборок. Иногда достаточно создать низкополигональные модели мебели, отражающие сугубо её габаритные размеры, после чего, создав 3D-модель внутреннего пространства помещения, можно приступать к расстановке объектов по местам. У данного способа проектирования есть множество преимуществ:

- снижается риск ошибок при покупке мебели, поскольку заранее видно, поместится ли она в помещение и не перекроет ли проходы;
- уменьшается вероятность неправильных замеров, так как САД-модель позволяет работать с точными размерами и масштабами даже при отсутствии должных навыков;
- экономится время на перепланировку, так как можно быстро перебрать десятки вариантов расположения предметов;
- не нужно физически двигать тяжёлую мебель для проверки разных вариантов расстановки, а уточнить их при помощи виртуальной модели;
- можно заранее оценить эргономику пространства, например, удобно ли открываются дверцы шкафов или хватает ли места для рабочего стола;
- легко визуализировать будущий интерьер, что помогает лучше представить конечный результат и избежать разочарований после ремонта;
- позволяет проконтролировать совместимость мебели между собой, например оценить, не будут ли элементы мешать друг другу;

- можно заранее продумать расположение розеток, выключателей и коммуникаций, чтобы не переделывать электрику после установки мебели;
- упрощается взаимодействие с дизайнерами и строителями, так как можно показать им готовую модель, а не объяснять словами.

Основным преимуществом данного способа является тот факт, что его можно использовать даже при наличии минимальных навыков 3D-моделирования, так как низкополигональные модели просты в создании и не требуют профессионального опыта. В качестве примера можно привести комнату одного из студенческих общежитий, в которую была закуплена новая мебель, и проживающим необходимо было сделать перестановку, исходя из её новой геометрии и размеров. Ввиду ограниченного пространства комнаты любая перепланировка сопровождается выносом всех объектов за её пределы, что является времязатратной и тяжёлой задачей. Однако, имея базовые навыки работы в 3D-пространстве, можно измерить размеры мебели и создать её простые виртуальные модели. В результате за 1 час был создан комплект мебели и модель комнаты (рисунок 1), после чего за 10 минут была подобрана эргономичная и удобная расстановка объектов. В качестве дополнения были сразу отмечены отверстия для крепления навесных полок и расположение электроприборов.

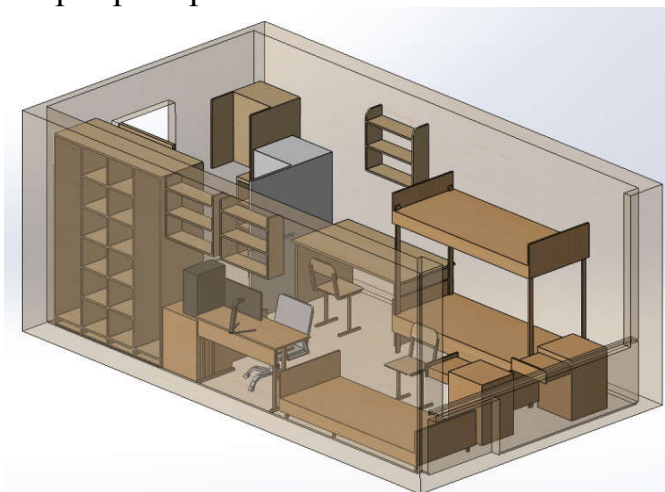


Рисунок 1 – 3D-модель комнаты

Таким образом, использование САД-систем оказывается эффективным инструментом не только в профессиональной архитектурной практике, но и при решении повседневных бытовых задач. Даже обладая минимальными навыками трёхмерного моделирования, пользователь может быстро и безопасно оценить различные варианты планировки, избежать ошибок и оптимизировать пространство. Рассмотренный пример демонстрирует, что цифровые модели позволяют существенно экономить время и усилия, а развитие технологий открывает путь к интеграции цифровых двойников, VR-сред и интеллектуальных систем проектирования, которые в будущем сделают процесс создания интерьера ещё более удобным и доступным.

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ROS ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РОБОВОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Руселевич Д.Д. , Прохорович С.С.

Беларуский Национальный Технический Университет  
Минск, Республика Беларусь

В современном мире всё чаще и чаще различные предприятия прибегают к использованию различных робототехнических систем для оптимизации работы. К примеру, мобильные комплексы могут выполнять различные задачи, к примеру перевозка грузов. Однако для эффективной работы таких устройств необходимо наличие большого количества датчиков для навигации и не только. Для обработки всех получаемых с датчиков данных требуются сложные алгоритмы и вычислительная техника способная обрабатывать полученные данные с высокой скоростью и минимальной задержкой.

Для реализации управления многофункциональной мобильной роботизированной системой на базе Studica Robotics применяется два уровня управления: высокий и низкий.[1]

Низкий уровень отвечает за сбор данных с датчиков, задачи регулирующего ШИМ (широтно-импульсная модуляция) сигнала для управления драйверами моторов или сервоприводов. В случае набора Studica реализован данный уровень на базе микроконтроллера STM32. Однако данный контроллер только собирает данные с датчиков, после чего отправляет полученные данные на систему управления высокого уровня.

Высокий уровень в данном устройстве реализован на базе одноплатного компьютера RaspberryPi. Данное устройство способно производить сложные вычисления по управлению устройством, обработки данных, полученных с низкого уровня управления, а также обрабатывать видео поток для реализации машинного зрения.[2]

Структура устройства представлена на рисунке 1.

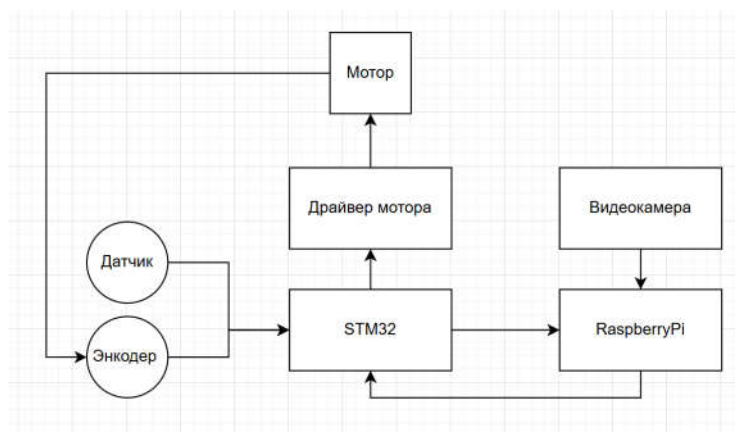


Рисунок 2 - Структура устройства

Для реализации управления данного устройства лучше всего подходит операционная система ROS (Robot Operating System). Данная система позволяет управлять роботом в режиме реального времени, а также записывать различные программы для автономного режима.[3]

ROS позволяет не только решать множественные задачи по реализации управления робототехнических систем, а так же позволяет упростить наладку таковых. К примеру, в системе ROS имеется возможность работы с данными при помощи использования publisher (издатель) и listener (подписчик). Данное решение позволяет реализовать процесс передачи и использования различных данных, к примеру показания датчиков, видеопотока и т.д.

Данная система также позволяет использовать множественные библиотеки и пакеты для реализации сложных процессов, к примеру машинное зрение. Так же данное решение позволяет реализовывать управление различными видами мобильных роботизированных систем одновременно, что позволяет реализовать не только сложные алгоритмы управления одним устройством, но и позволяет наладить управление несколькими независимыми устройствами входящими в один робототехнический комплекс.

В результате система, разработанная на базе операционной системы ROS является многофункциональной, простой в освоении и модификации, что позволяет упрощать создание различных робототехнических устройств.[4]

1. Курышкин, Н. П. Основы робототехники : учебное пособие / Н. П. Курышкин ; Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – 168 с. – ISBN 978-5-89070-833-5 .

2. Макаров, И. М. Робототехника: История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчиев. – Москва : Наука, 2003. – 349 с.

3. Багшыев, А. А. Историческое развитие и современные тенденции управления роботами-манипуляторами / А. А. Багшыев, А. Б. Чарыев, Г. Р. Алламырадова // Химическая технология и техника : материалы 89-й научно-технической конференции (Минск, 3–18 февраля 2025 г.). – Минск : БГТУ, 2025. – С. 404-406 .

4. Nof, S. Y. (Ed.). Handbook of Industrial Robotics / edited by Shimon Y. Nof. – 2nd ed. – New York : John Wiley, 1999. – 1348 p. – ISBN 0471177830 .

## МЕТОДИКА ТЕРМОГРАФИРОВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ КОРОВ

**Слимаков Д.Д., Гируцкий И.И.**

УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет»

Минск, Республика Беларусь

Эффективность диагностики воспалительных процессов молочной железы (мастит) методом инфракрасной термографии в условиях промышленного поточного производства напрямую зависит от научно обоснованного выбора регистрирующего оборудования. Поточное сканирование в транзитных зонах накладывает жесткие технические ограничения на быстроедействие и разрешающую способность аппаратуры.

Выбор рабочего длинноволнового инфракрасного диапазона (8–14 мкм) математически обосновывается законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (1)$$

где  $b \approx 2898$  мкм·К – постоянная Вина. Согласно исследованиям биометрических и температурных параметров, физиологическая температура поверхности вымени клинически здоровой коровы составляет в среднем  $36,2$  °С, а при развитии мастита локально повышается до  $39,6$  °С (абсолютная температура  $T \approx 311$  К) [1]. Подставляя данное значение в уравнение (1), определяем пиковую длину волны излучения вымени:  $\lambda_{\max} \approx 9,32$  мкм. Полученное значение находится точно в середине спектрального окна 8–14 мкм.

Важнейшим аспектом поточного термографирования является компенсация динамического размытия контуров. По данным натурных измерений, максимальная скорость перемещения коровы шагом в транзитной зоне может достигать  $v = 1,8$  м/с [1]. Смещение объекта  $\Delta S$  за время смены одного кадра определяется зависимостью:

$$\Delta S = \frac{v}{fps} \quad (2)$$

где fps – кадровая частота (кадров в секунду).

При использовании стандартных тепловизоров общепромышленного назначения (fps = 9 Гц) смещение составит  $\Delta S = 1,8 / 9 = 0,20$  м (20 см). Учитывая, что средний диаметр соска вымени составляет всего 2...4 см, смещение в 20 см приведет к критическому размытию и сделает невозможной корректную работу алгоритмов локализации. Для устранения этого эффекта обосновано применение ИК-модулей с частотой не менее 30 Гц, что сокращает межкадровое смещение до допустимых 6 см.

Для автоматического анализа термограмм в условиях шумовых артефактов (элементы станков, блики) предложена гибридная структура нейронной сети. Для первичной локализации вымени выбрана архитектура

одностадийного детектора YOLOv8, демонстрирующая оптимальный баланс между скоростью вывода (до 80–100 fps) и точностью по сравнению с двухстадийными сетями (Рисунок 1) [2].

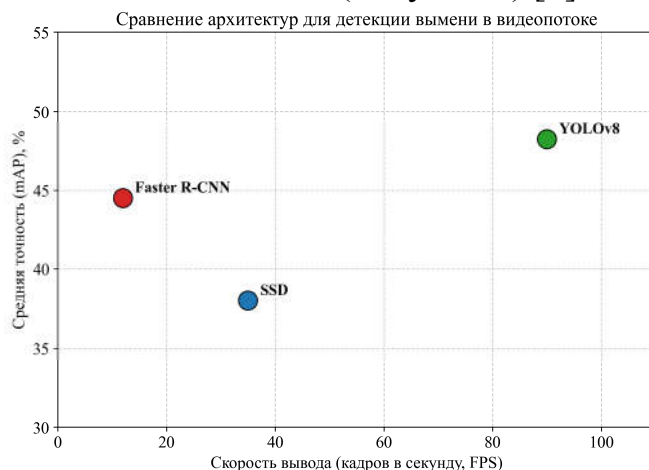


Рисунок 1 – Сравнительный анализ производительности архитектур нейронных сетей для задачи локализации

На втором этапе вырезанный фрагмент подается на полносверточную сеть U-Net [3]. Наличие пропусков признаков между слоями позволяет сети восстанавливать пространственную информацию и формировать точную бинарную маску молочной железы. Предложенная каскадная обработка «YOLO + U-Net» снижает вычислительную нагрузку, отсекая до 80 % фона, и обеспечивает прецизионную попиксельную точность, необходимую для диагностирования мастита с минимальной вероятностью ошибки.

1. Юрочка, С. С. Разработка методов определения биометрических и температурных параметров вымени лактирующих животных на основе оптических технологий : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юрочка Сергей Сергеевич, 2022. – 170 с. – EDN ITRJPN.

2. YOLO by Ultralytics [Электронный ресурс] / G. Jocher [et al.]. – Режим доступа: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>. – Дата доступа: 28.02.2026.

3. Ronneberger, O. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. – Springer International Publishing, 2015. – P. 234–241.

## **ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.**

**Страусов А.К., Ткаченко В.В.**

Объединённый институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь.

Создание единой информационной среды, обеспечивающей эффективное взаимодействие конструктора и технолога на этапах проектирования и технологической подготовки аддитивного производства, отвечает современным условиям цифровой трансформации промышленности. Разрозненность данных, использование несвязанных программных средств и отсутствие централизованного управления проектной информацией приводят к увеличению сроков разработки изделий, росту ошибок и усложнению контроля. В докладе представляется разработка программного комплекса для системы информационной поддержки процессов конструкторско-технологической подготовки.

Система реализована по клиент–серверной архитектуре для работы в пределах локальной сети предприятия без необходимости выхода в интернет, что соответствует требованиям информационной безопасности для изолированных сегментов. Клиентская часть представляет собой одностраничное веб-приложение, функционирующее в современном браузере пользователя. Серверная часть реализована на платформе Node.js с использованием фреймворка Express и обеспечивает выполнение бизнес-логики, обработку запросов, разграничение прав доступа и взаимодействие с системой управления базами данных PostgreSQL. Обмен данными между клиентом и сервером осуществляется по протоколу HTTP/HTTPS с использованием формата JSON, что обеспечивает унификацию взаимодействия и расширяемость системы.

В рабочем окне проекта реализованы механизмы выбора и создания элементов, управления их характеристиками и ресурсами с использованием внутренних модулей инженерного расчёта и САПР приложений (SolidWorks, ANSYS, Компас 3D, Simulink и др.). Система поддерживает работу как с обязательными, так и с дополнительными параметрами, что позволяет адаптировать её к различным типам изделий и производственных процессов. Отдельное внимание уделено ведению библиотек материалов и оборудования, которые могут создаваться, редактироваться и использоваться в рамках конкретных проектов. Централизованное хранение этих данных в СУБД PostgreSQL обеспечивает целостность информации и исключает дублирование записей, структура показана на рисунке 1.

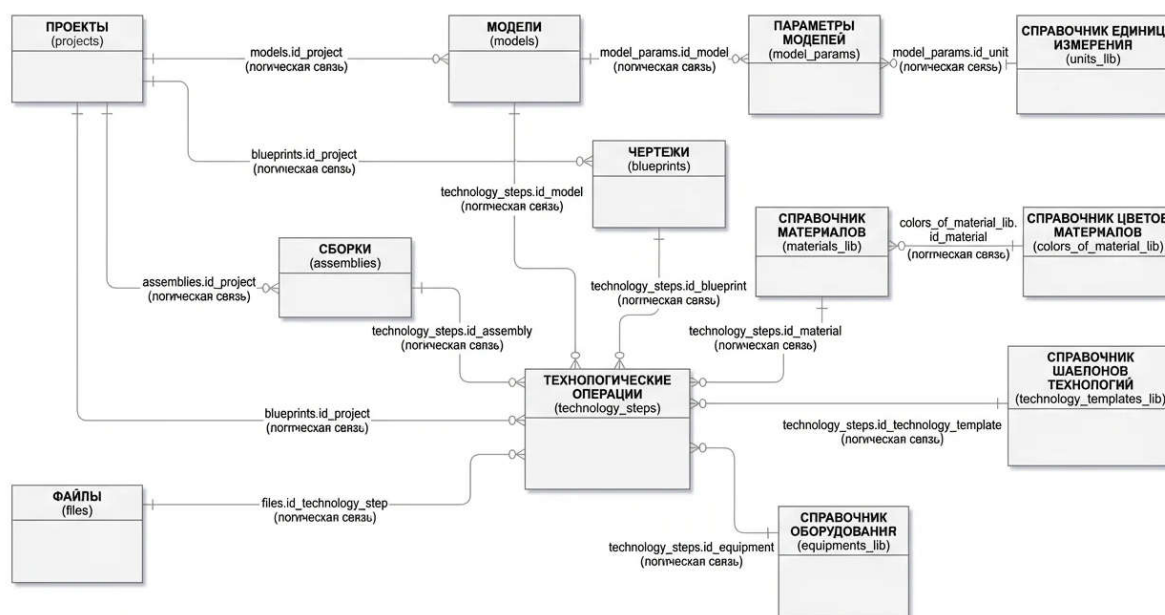


Рисунок 1. Структура данных комплекса поддержки.

Для повышения уровня безопасности в системе применяются механизмы хеширования паролей с использованием библиотеки `bcryptjs`, а также аутентификация на основе `JSON Web Token`. Генерация уникальных идентификаторов сущностей осуществляется с использованием `UUID`, что обеспечивает корректную идентификацию проектов и элементов в распределённой среде.

Развёртывание системы возможно как на одном сервере, так и с распределением серверной части и базы данных на разных машинах, включая вычислительные кластеры Республиканского суперкомпьютерного центра (ОИПИ НАН Беларуси). Такой подход обеспечивает гибкость масштабирования в зависимости от количества пользователей и объёма обрабатываемых данных. Использование сборщика `Vite` и современных средств минимизации и обфускации кода позволяет повысить защищённость клиентской части при поставке и затруднить анализ внутренней логики приложения. Дополнительная проверка зависимостей и контроль целостности поставляемых ресурсов способствуют повышению надёжности эксплуатации.

Программный комплекс представляет собой современное веб-ориентированное решение для автоматизации процессов конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства. Реализация клиент–серверной архитектуры, использование актуальных программных технологий и обеспечение автономности функционирования в локальной сети формируют основу для дальнейшего развития системы, её интеграции с другими информационными ресурсами предприятия и расширения функциональных возможностей. Разработка способствует созданию единой цифровой среды проектирования и может рассматриваться как шаг к построению комплексных систем поддержки жизненного цикла изделий 3D печати в машино- и приборостроении.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КВАНТОВАНИЯ ЭМБЕДДИНГОВ В GOOGLE GEMINI

Сушкевич Е.П., Прихожий А.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Современные робототехнические системы, системы искусственного интеллекта, системы анализа научных публикаций и многие другие требуют эффективных способов представления семантической информации. Векторные представления (эмбединги) стали стандартом для моделирования семантики в числовом пространстве, где близость векторов соответствует смысловой схожести текстов [1]. Высокая размерность эмбедингов создает нагрузку на системы хранения и обработки информации. Методы сжатия, квантования данных помогают решить эту проблему. Семантические эмбединги формируются в процессе обучения нейросетевых моделей на больших массивах текстовых данных. Современные архитектуры, включая трансформеры, кодируют смысловые отношения в виде векторов фиксированной размерности. Передовые модели, подобные Google Gemini, используют технологию Matryoshka Representation Learning, позволяющую адаптировать размерность вектора в зависимости от решаемой задачи. Это обеспечивает баланс между точностью представления и вычислительной эффективностью. Предлагаемая методика квантования заключается в преобразовании 32-битных чисел с плавающей точкой в 8-битные целые числа: 1) исходные значения нормализуются к диапазону  $[-1, 1]$ ; 2) полученные значения масштабируются и округляются до целочисленных значений в интервале  $[-127, 127]$ . Несмотря на потерю точности, семантическая информация сохраняется благодаря распределенному характеру представления данных в многомерном пространстве. Для подтверждения эффективности методики проведено преобразование эмбединга научной статьи из базы данных arXiv (идентификатор arXiv:0704.0001). Квантование сократило объем занимаемой памяти с 3072 байт до 768 байт. Качественная оценка результатов основывалась на предположении о сохранении относительных расстояний между векторами в семантическом пространстве. Теоретические выкладки подтверждают, что ошибка квантования не влияет существенно на результаты операций сравнения эмбедингов, таких как вычисление косинусного сходства. Достигнутый результат — четырехкратное сокращение объема памяти для хранения эмбединга — имеет практическое значение для построения масштабируемых систем обработки больших данных.

1. Хобсон, Л., Ханнес Х., Коул Х. Обработка естественного языка в действии. - СПб.: Питер, 2021. -576 с.

## ЭЛЕКТРОПРИВОД СТЕРЖНЕВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Цвирко Е.Э., Александровский С.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Стержневая мельница является машиной для грубого измельчения рудного и горно-химического сырья, обычно до зернистости 0,5 - 1,0 мм. Измельчение в стержневых мельницах проводится как в сухой, так и в водной среде. Конструктивно мельница представляет собой стальной барабан, футерованный изнутри элементами из износостойкой стали волнистого профиля. Мелющими телами являются стальные стержни круглого сечения. Различают мельницы с центральной и периферической загрузкой материала [1-4].

Стержневые мельницы применяются как основная стадия измельчения горно-химического сырья в замкнутом цикле производства калийных удобрений, основные операции обогащения которых не требуют тонкого измельчения.

Вращение мельниц осуществляется от электродвигателя мощностью от 22кВт до 1800кВт в зависимости от производительности (объема барабана) мельницы. Производительность мельниц может регулироваться от 40% до 100% от номинальной, при этом возможно регулирование скорости в диапазоне 1,5:1.

При регулировании подачи материала в мельницу за счет положения заслонки применяют не регулируемый электропривод с асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором серий АОМ и АЗД (во всем диапазоне мощностей) и с синхронным двигателем (СД) с электромагнитным возбуждением серий СДМ и СДВ (мощности от 400 кВт). Применение СД является предпочтительным, поскольку изменение тока возбуждения позволяет изменять коэффициент мощности и СД может работать как компенсатор реактивной мощности. Применение СД в ряде случаев позволяет исключить передаточный механизм (повышение общего КПД системы), т.к. СД имеют частоту вращения от 75 об/мин, а АД – 500 об/мин [3].

В случае изменения производительности мельницы за счет регулирования скорости двигателя применяются следующие системы электропривода:

1. АД с фазным ротором (серии АОК и АКЗ) и реостатным управлением;
2. АД с короткозамкнутым ротором и частотным управлением от преобразователя частоты (ПЧ);
3. СД и частотным управлением от ПЧ.

Преимуществом системы электропривода с АД с фазным ротором является обеспечение большого пускового момента при ограничении

пусковых токов двигателя, что особенно важно при запуске загруженной мельницы, а также длительная работа с перегрузками. Система электропривода с АД и фазным ротором имеет более простую и дешевую схему по сравнению с частотным управлением. В тоже время такая система обладает меньшим КПД, поскольку часть энергии рассеивается на внешних реостатах.

Применение ПЧ позволяет создавать экономичные системы электропривода с АД и СД. В таких электроприводах регулирование скорости осуществляется за счет плавного изменения величины и частоты питающего двигателя напряжения, т.е. к электродвигателю подводится электроэнергия необходимая для выполнения полезной работы.

Электродвигатели для стержневой мельницы мощностью 400кВт и выше имеют номинальное напряжение питания 3кВ, 6кВ или 10кВ, что требует применения многоуровневых преобразователей частоты. Многоуровневые ПЧ имеют большое многообразие схемных решений и в большинстве случаев они базируются на структуре двухзвенного ПЧ с неуправляемым диодным выпрямителем на входе. Неуправляемый выпрямитель обеспечивает однонаправленную передачу энергии исключая циркулирование реактивного тока от источника к электродвигателю и обратно. Т.е. в этом случае работа АД и СД для сети будет одинаковой без возможности компенсации реактивной мощности, что исключает одно из преимуществ СД по сравнению с АД.

Также можно отметить, что ПЧ имеют ограничение максимального тока преобразователя, следовательно и двигателя, что приводит к ограничению максимального момента двигателя в переходных процессах, особенно при пуске под нагрузкой.

Таким образом, выбор той или иной системы электропривода для стержневой мельницы зависит от условий работы и общих требований.

1. Перов, В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов / В.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 301с.

2. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576с.

3. Кохан, Л.С. Механическое оборудование цехов по производству цветных металлов: [учебное пособие для вузов по специальности "Механическое оборудование заводов цветной металлургии"] / Л.С. Кохан, А.Г. Навроцкий. – Москва: Металлургия, 1985. – 312с.

4. Мельницы стержневые и шаровые. Общие технические требования. ГОСТ 10141-91. – Введ. 02.07.1992. – Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 21с.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРЕВЕНТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**Янкевич Н.С.**

ГНУ "Центр системного анализа и стратегических исследований НАН  
Беларуси"

Минск, Республика Беларусь

Современный транспорт и технологии связи развиваются стремительно, однако повышение уровня требований стандартов безопасности выявляет потребность в разработке инновационных методов управления рисками. Несмотря на то, что уровень безопасности эксплуатации транспортных средств постоянно повышается, остаются нерешенными проблемы принятия эффективных решений в условиях воздействия внешней среды с учетом человеческого фактора. Не менее значимой остается задача повышения надежности компонентов транспортных средств, непосредственно влияющих на предотвращение аварийных ситуаций.

При этом довольно сложно определить оптимальные значения параметров, влияющих на безопасность транспортного средства, если использовать только современные электронные средства диагностики и контроля. Считается, что вопрос выбора и применения различных датчиков на настоящий момент уже достаточно детально изучен. Поэтому особый интерес вызывают инновационные подходы, основанные на применении методов искусственного интеллекта, позволяющие анализировать и оценить как текущее состояние автомобиля, так и прогнозировать его надежность в будущем.

В сфере стандартизации дорожной информации сохраняется ряд нерешенных вопросов. Наибольший объем работы был выполнен в области стандартизации связи между инфраструктурой и пользователем (т.е. от центра управления автомобиля, I2V).

Существенный прорыв связан с решениями, базирующимися на связях V2V (автомобиль – автомобиль) и V2I (автомобиль – инфраструктура). Их реализация позволяет не только оптимизировать работу транспортной системы, но и повысить безопасность всех участников дорожного движения, включая водителей и пешеходов.

Ключевым элементом реализации такого подхода может стать коммуникационная система, предоставляющая водителю актуальную информацию о состоянии его транспортного средства с последующим анализом причин и последствий возникающего отказа. При возникновении потенциально опасного аварийного состояния представляется полезным включить функцию полуавтоматической или автоматической перестройки аварийного автомобиля на крайнюю полосу.

На начальных этапах для прогнозирования отказов транспортных средств и определения оптимальных режимов их эксплуатации применялись статистические методы, однако их точность оказалась недостаточной. Существенное повышение точности возможно в случае, если известна функция распределения отказов, что требует обработки значительных массивов статистических данных (Big Data).

Ключевым этапом стало создание алгоритмов машинного обучения, которые позволяют не только классифицировать состояния транспортного средства, но и прогнозировать отказы на основе динамики изменения параметров и статистики отказов.

Разработанные методики были интегрированы в сетевую модель транспортного средства, причем ее архитектурные принципы определяли характер межуровневых информационных связей, характер взаимодействия между модулями системы, а также способы обмена данными с внешней средой [1, 2].

В рамках модели окружающая среда, водитель и подсистемы транспортного средства были представлены как элементы разной степени полноты. При этом особое внимание было уделено детализированной сетевой модели двигателя внутреннего сгорания, остальные компоненты были описаны в упрощенном виде.

Система прогнозирования базируется на математическом моделировании, используя проектный набор контрольных параметров и специфическую информацию о текущем состоянии объекта. Реализация такого подхода требует формирования базы данных по транспортному средству, применения достаточно сложного математического аппарата, а также длительного периода адаптации системы для калибровки модели с учетом реальных характеристик транспортного средства во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Перспективным направлением является интеграция данных подходов в глобальную интеллектуальную транспортную систему, что позволит реализовать заложенные в них преимущества, а именно: ранняя диагностика в режиме реального времени, прогнозирование как последствий, так и причин возникающих отказов, что делает возможным раннее реагирование и исключение аварийной ситуации.

Разработанные подходы носят универсальный характер и могут найти применение при решении ряда практических задач.

1. Янкевич Н.С. Применение информационных и коммуникационных технологий для контроля технического состояния машин в транспортном потоке// «Цифровая трансформация», ISSN 2522-9613 (Print), ISSN 2524-2822 (Online) - № 1, 2018. – С. 66-71.

2. Yankevich N. System of the preventive diagnostics as an integrated part of “smart” transport system// Journal of Industrial Engineering International, manuscript number - JIEI-D-17-00187R1; vol. 15, n. 3, pp 479–486 (2019).