

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ 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 – 2025»

Материалы XIII международной научно-практической конференции

(Минск, 19 марта 2025 года)

Минск
2025

УДК 658.51:004(082)
ББК 32.965я43

Редакционная коллегия:

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

СОДЕРЖАНИЕ

1. THE IMPACT OF INDUSTRIAL COMMUNICATION PROTOCOLS ON THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC CELLS.....	
Marchenko I.S., Sajjad Ahmed M.R.	7
2. ДЕТЕКЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ LED-ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ YOLOV8 И ROBOFLOW.....	
Азаревич В.А., Ковалева И.Л.	9
3. КПД СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ.....	
Александровский С.В.....	11
4. КОНКУРСНАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ КРЕАТИВНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТОТЕХНИКИ	
Алисеенко Д.С.	13
5. КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ.....	
Барышев А.А., Лозичный А.С.	15
6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМИ ЗАПАСАМИ.....	
Баяманова А., Ковалева И.Л.	16
7. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КАБИНЫ ЛЕСНОЙ МАШИНЫ.....	
Бородуля А.В. ¹ , Напрасников В.В. ¹ , Кункевич Д.П. ¹ , Соловьев А.Н. ²	17
8. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ГРАФАХ НА ОСНОВЕ МАТЛАВ.....	
Бородуля А.В. ¹ , Напрасников В.В. ¹ , Кункевич Д.П. ¹ , Соловьев А.Н. ²	19
9. СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И НЕОДИМОВЫЕ МАГНИТЫ.....	
Брель В.В.	21
10. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	
Васильев С. В.	22
11. ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИЕЙ.....	
Вашкевич И.С., Гутич И.И.	24
12. ПОВЕДЕНИЕ ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ ДРОНА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТА	
Вельченко А.А., Павлюковец С.А., Радкевич А.А.	27
13. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА ЛЭП С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ.....	
Воюш Н.В., Сухобоков А.А.	29
14. ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИКОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ БЕСКАНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ КРС	
Гируцкий И.И., ¹ Сеньков А.Г., ² Немирович С.И. ¹	31
15. КОРПОРАТИВНАЯ СРЕДА ВИРТУАЛИЗАЦИИ - ProxMox.....	
Дербан А.Н. ¹ , Бусько А.М. ²	33
16. ВИРТУАЛЬНОЕ ХРАНИЛИЩЕ VMWARE VIRTUAL SAN	
Дербан А.Н. ¹ , Бусько А.М. ²	34
17. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЕ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	
Дубинин С.В.	35

18. ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АГРОДРОНА	
Заярный В.П., Дубинин С.В.	37
19. ПРОГРАММНЫЕ СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ПОЛЕТ АГРОДРОНА	
Заярный В.П., Дубинин С.В.	39
20. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ	
Ибрагим А.К.	41
21. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ТИТАНА ВТ1	
Иванов А.И., Сенченко Г.М.	43
22. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ	
Иванов И.А., Ковалевич Э.В.	45
23. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СКОРОСТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ	
Качанов И.В., Ленкевич С.А., Быков К.Ю., Шаталов И.М., Кундир М.А.	47
24. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИ СКОРОСТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
Качанов И.В., Ленкевич С.А., Власов В.В., Шаталов И.М., Махнач Н.А.	49
25. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ С РЕГУЛЯРНОЙ СЕТЧАТОЙ СТРУКТУРОЙ	
Королёв А.Ю., Нисс В.С.	52
26. ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ	
Королёв А.Ю., Нисс В.С., Рожков В.А.	54
27. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ШТАТНОЙ И ПРЕДЛАГАЕМОЙ ДВУКРАТНО ИНВАРИАНТНОЙ САР РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА Е-75-3,9-440 ГМ БРЕСТСКОЙ ТЭЦ	
Кулаков Г.Т., Кравченко В.В.	56
28. ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОТЛА Е-75-3,9-440 ГМ	
Кулаков Г.Т., Кравченко В.В., Воюш Н.В.	60
29. КРИТЕРИИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ	
Лобатый А.А.	63
30. МОДУЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	
Ляшевич М.С., Гутич И.И.	64
31. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЯГКИХ ЗАХВАТОВ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
Марченко И.С., Гармаза Д.И., Ходатович А.С.	66
32. ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ ЯЧЕЙКА НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА	
Марченко И.С. ¹ , Матрунчик Ю.Н. ¹ , Боровко И.О. ² , Коваленко В.С. ² , Серов М.П. ²	68

33. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДЕЛЬТА-РОБОТА С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ УПРАВЛЕНИЯ	
Матрунчик Ю.Н., Марченко И.С., Слизавский М.О., Вороник Л.Ч.	70
34. ТРЁХКООРДИНАТНАЯ ЮСТИРОВКА ОСНОВНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ИНСТРУМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА	
Матрунчик Ю.Н., Семижон Е.Д.	72
35. СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОКРУЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ	
Матрунчик Ю.Н. ¹ , Прохорович С.С. ¹ , Дубатовка В.В. ² , Иванченко М.А. ²	74
36. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ТУРКМЕНИСТАНА	
Мередова Х.А., Ашыров А.И., Курбанова М.А.	76
37. МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	
Напрасников В.В. ¹ , Бородуля А.В. ¹ , Полозков Ю.В. ¹ , Соловьев А.Н. ²	78
38. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА ДЛЯ СИНТЕЗА УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ Несенчук А.А.	81
39. ПОРИСТОСТЬ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ	
Нисс В.С., Королёв А.Ю., Паршута А.Э., Сорока Е.В.	83
40. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПРИ УЧЕТЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Нитиевский С.А.	85
41. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ОБЛАСТЕЙ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДЕЙКСТРЫ	
Огородник И.В. ¹ , Полозков Ю.В. ¹ , Кункевич Д.П. ¹ , Полозков А.Ю. ²	87
42. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ	
Опейко О.Ф.	89
43. АНАЛИЗ МАНЕВРЕННОСТИ МЕКАНУМ-КОЛЕС МОБИЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО РОБОТА	
Павлюковец С.А.	91
44. ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СРЕДАХ	
Радкевич А.А.	93
45. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ ВЕНТИЛЬНЫХ АКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	
Радкевич А.А., Буйвид А.П.	95
46. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭШЕЛОНИРОВАНИЕМ ПОЛЕТОВ	
Санникович И.А., Околов А.Р.	97
47. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ	
Сидорик В.В. ¹	99
48. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	
Сидорик В.В. ¹	101
49. СОБСТВЕННОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	
Тимошевич В.Б.	103

50. ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ НА СОРТОВОМ ПРОКАТЕ СТАЛИ 20Г2Р ПОСЛЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА	
Хина Б.Б. ¹ , Покровский А.И. ¹ , Глушаков А.Н. ¹ , Сотов К.А. ¹ , Панковец И.А. ²	104
51. КОМПЛЕКСНАЯ МУЛЬТИМЕДИЙНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	
Юденков В. С.	106
52. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ	
Ян Шисинь, У Синьсинь, Чаплыгин Д.Ю., Павлюковец С.А.	108

THE IMPACT OF INDUSTRIAL COMMUNICATION PROTOCOLS ON THE DEVELOPMENT OF ROBOTIC CELLS

Marchenko I.S., Sajjad Ahmed M.R.
Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus.

In automated systems, such as a robotic cell, effective communication between various devices is crucial for ensuring smooth operation and synchronization. The devices involved require a carefully sized communication infrastructure to handle the flow of data between them. Sizing the necessary communication involves evaluating factors like data volume, required response times, and the number of devices to be connected.

The communication between devices relies on modern industrial Ethernet protocols, which offer high-speed, reliable, and scalable data transfer capabilities. The protocols used include ProfiNet, Ethernet/IP, Modbus TCP/IP and many others, all of the, operate over standard Ethernet networks and are widely adopted in industrial automation. Ethernet/IP is designed for real-time control and data exchange, where precise control of movements and status updates is required. Similarly, Modbus TCP/IP is utilized for communication, enabling the exchange of machining commands, feedback on operational status, and completion signals. These Ethernet-based protocols ensure seamless integration and synchronization of the robotic cell, allowing for efficient and coordinated automation. Those protocols became standard feature for many industrial automation devices, that is why the impact of using them is not that clear in comparison with non-industrial protocols.

During the completion of the diploma project on the topic "CNC-milling machine robotic cell" 6-axis industrial robot HIWIN RA605 has been used. In modern versions of the same robot controller provides Modbus TCP as standard and optional ProfiNet. Using the Modbus and ProfiNet protocols on newer models of the robot controller, it's possible not to create an executing program for its side at all, but only send them by packages from the PLC.

But in existing robot controller communication is established either via Ethernet TCP/IP or via RS-232. Described case relies solely on TCP/IP for communication, that requires extensive programming to manage interactions between the robot and PLC. Start by designing a clear communication protocol that specifies message structure, data inclusion, and error handling. Utilize socket programming to establish connections through server and client sockets for data exchange. Implement data serialization methods (like JSON or XML) to facilitate sending complex data structures over TCP/IP.

The CNC Milling machine which is used in the same project controlled with Mach3 breakout board, which is enthusiast solution that doesn't seem to be completely industrial. But even its software provides Modbus RTU and TCP communication protocols, which simplifies integration with external equipment

and enhances its programming abilities. Mach3 also provides system variables that are extremely useful for feedback to the PLC when the machining operation is complete.

There is also the technical possibility to integrate devices into a robotic cell by linking their discrete inputs and outputs, which may seem simpler at first glance. However, this will require excessive use of wires, even more redundant programming and more time-consuming commissioning. The maintainability of such solutions is also extremely low.

With the available capabilities, the following interaction algorithm was chosen: the PLC sends commands to the robot to pick up or place parts, and the robot acknowledges these commands. Status updates, such as whether the part was successfully picked up or if an error occurred, are sent back to the PLC for further actions. The PLC is also responsible for coordinating the operation of the CNC machine. It communicates with it using Modbus TCP. The PLC sends signals to the CNC machine to begin machining once the part is placed on the machine's table. Feedback from the CNC machine, such as completion signals, is sent back to the PLC, which then directs the robot to remove the finished part and place it back onto the conveyor belt.

While the robot and CNC machine do not communicate directly, the PLC ensures their synchronization. The PLC sends commands to the robot to pick up, place, and remove parts at the right times, ensuring the workflow is smooth and error-free. By managing the sequence of operations, the PLC prevents delays and overlap, improving efficiency. It monitors various sensors on the conveyor belt, robot, and CNC machine to track the status of parts and machines. This solution also scalable and could be improved by adding HMI panel or connection to some SCADA.

The robot's movements are programmed via HRSS (Hiwin Robot System Software), which provides precise control over the robot's pick-and-place operations. The robot places parts on the CNC machine's table and waits for confirmation that the part is positioned correctly before the CNC begins machining. Once machining is complete, the robot retrieves the part and returns it to the conveyor.

The integration of the HIWIN RA-605 robot, CNC Router 4030, and PLC programming enhances the manufacturing process by automating part handling and machining. This reduces the need for manual intervention, lowers the risk of errors, and increases overall productivity. The precise coordination between the robot, CNC machine, and PLC ensures that the system operates efficiently, with each component working in harmony to meet production requirements.

1. Kief, H. B., Roschiwal, H. A., Schwarz, K. The CNC Handbook: Digital Manufacturing and Automation from CNC to Industry 4.0. – New York, Industrial Press, 2022. — 720 p.
2. Kandray, D. Programmable Automation Technologies. – New York, Industrial Press, 2022. — 528 pages.

ДЕТЕКЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ LED-ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ YOLOV8 И ROBOFLOW

Азаревич В.А., Ковалева И.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В работах [1] и [2] определение положения рабочего инструмента 3D-принтера, на котором расположен LED-излучатель, выполнялось с помощью нейронной сети YOLOv4. С целью повышения скорости и точности обработки данных было принято решение использовать для детекции более современную модель обнаружения объектов YOLOv8.

Подготовка набора данных для YOLOv8 является сложным и трудоемким процессом. Чтобы его упростить, был использован сервис Roboflow [3], который предоставляет удобные инструменты для сбора изображений, их разметки, а также обеспечивает возможность загружать уже существующие аннотации. Это позволило использовать данные, сформированные ранее для YOLOv4, минуя повторную разметку, и конвертировать аннотации в формат, совместимый с YOLOv8.

Для повышения адаптации системы к разным условиям съемки и улучшения точности детекции была выполнена предварительная обработка сформированных данных. Она включала авто-ориентацию (анализ EXIF-данных изображений и, если необходимо, поворот их в правильное положение), масштабирование изображений до нужного разрешения, а также автоматическую настройку контрастности (для усиления различия между объектами и фоном).

После предварительной обработки данных был выполнен этап аугментации. Этот процесс включает в себя создание искусственных вариантов исходных изображений с помощью различных трансформаций, таких как повороты и обрезка (улучшают стабильность детекции, если инструмент с LED-излучателем будет виден под разными углами или частично закрыт), изменение яркости и контрастности (помогают выполнять детекцию в любых условиях освещения), добавление шума и размытия (дают возможность распознавать инструмент с LED-излучателем даже в случае помех или когда изображение не будет идеально четким). Аугментация помогает значительно увеличить объем данных, снижая риск переобучения.

Roboflow предоставляет подробные метрики, характеризующие эффективность процесса обучения. К ним относятся mAP [2], box loss (оценивает, насколько точно модель предсказала позицию, размер и форму ограничивающих прямоугольников), class loss (измеряет ошибку в классификации объектов) и object loss (оценивает, насколько правильно модель предсказала, что объект существует в том или ином месте изображения). На рисунке 1 приведен график изменения mAP, который

демонстрирует успешное обучение модели. Значение mAP стабильно достигает высокого значения (~1.0), а mAP@50:95, будучи более строгой метрикой, т.к. учитывает детекции на множестве порогов IoU от 50% до 95%, выросла до ~0.65. Это указывает на то, что модель хорошо справляется как с базовым детектированием, так и с более сложными случаями, требующими высокой точности локализации LED-излучателя.

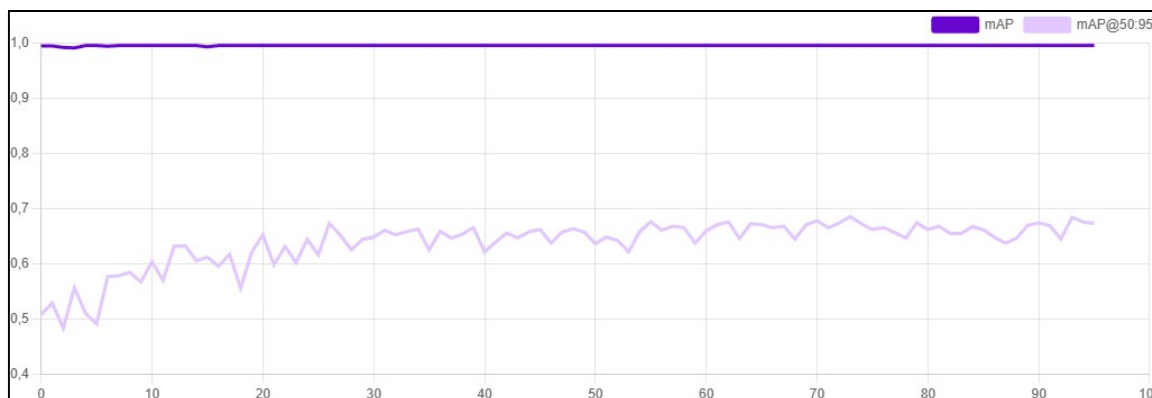


Рисунок 1 – График изменения mAP и mAP@50:95

Переход на YOLOv8 значительно улучшил распознавание LED-излучателя на рабочем инструменте 3D-принтера. Благодаря более высокой скорости работы как на CPU, так и на GPU, YOLOv8 обеспечивает быструю и стабильную обработку данных, что критично для задач реального времени. Современная архитектура YOLOv8 улучшила детекцию в условиях сложного освещения и изменяющихся углов обзора, часто встречающихся в 3D-принтерах. Roboflow упростил подготовку данных, автоматизировал разметку изображений, аугментацию и преобразование в подходящий формат, что повысило качество выборки и устойчивость модели. Это привело к более надёжному и эффективному распознаванию LED-излучателя, даже в условиях повышенной сложности.

1. Мисякова, В. А. Обучение нейронной сети для обнаружения диода в видеопотоке / В. А. Мисякова ; науч. рук. И. Л. Ковалева // Актуальные вопросы и направления в инженерии : материалы 80-ой студенческой научно-технической конференции БНТУ, апрель – май 2024 года / редкол.: А. М. Авсиевич, Ю. В. Полозков, С. В. Александровский [и др.] ; сост. В. А. Мартинович. – Минск : БНТУ, 2024. – С. 343-347.
2. Мисякова, В. А. Выбор модели нейронной сети для отслеживания движения рабочего инструмента 3D-принтера / В.А. Мисякова, И.Л.Ковалева // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 35. – С. 92-96.
3. Build Vision Models with Roboflow [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.roboflow.com> (Дата обращения: 04.01.2025)

КПД СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Александровский С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) с векторным управлением в настоящее время находят широкое применение в машино- и станкостроении, робототехнике и транспорте. Данные двигатели обладают высокими энергетическими характеристиками, что совместно с использованием скалярного частотного управления (СЧУ), как более простое по сравнению с ВУ, создает предпосылки для применения СДПМ в других областях. Перспективным является применение СДПМ для такой группы промышленных механизмов как турбомеханизмы, к которой относятся, например, центробежные вентиляторы и насосы. Для турбомеханизмов характерна зависимость момента статического сопротивления от угловой скорости и на практике для большинства турбомеханизмов принимается квадратичная зависимость момента сопротивления от скорости. Поэтому представляет интерес исследовать энергетические показатели, в частности коэффициент полезного действия, в частотно-регулируемом СДПМ применяемого в электроприводе турбомеханизмов.

Потери мощности при исследовании коэффициента полезного действия частотно-регулируемого СДПМ рассматриваются для установившегося режима работы двигателя, когда $\omega = \omega_0 = \text{const}$.

В частотно-регулируемом СДПМ постоянные потери мощности состоят из потерь в стали статора $\Delta P_{\text{ст1}}$ и механических потерь $\Delta P_{\text{мх}}$ [1]:

$$\Delta P_{\text{пост.}} = \Delta P_{\text{ст.1}} + \Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{ст.1,ном}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (1)$$

где f_1 , $f_{1\text{ном}}$ – текущее и номинальное значение частоты изменения питающего статор напряжения; $\Delta P_{\text{ст1,ном}}$ – номинальные потери в стали статора; ω , $\omega_{\text{ном}}$ – текущее и номинальное значение угловой скорости ротора; $\Delta P_{\text{мх,ном}}$ – номинальные механические потери.

Для установившегося режима работы СДПМ при СЧУ относительная частота α равна относительной угловой скорости ротора v . Тогда постоянные потери мощности можно записать в виде:

$$\Delta P_{\text{пост.}} = \Delta P_{\text{ст.1,ном}} \alpha^{1,5} + \Delta P_{\text{мх,ном}} \alpha^2 \approx \Delta P_{\text{пост.,ном}} \alpha^2. \quad (2)$$

Переменные потери частотно-регулируемого СДПМ включают потери в обмотке статора: $\Delta P_{\text{пер,1}} = 3I_1^2 R_1$, где I_1 – действующее значение тока фазы статора, имеющего активное сопротивление R_1 .

Ток статора i_1 СДПМ можно принять равным коэффициенту загрузки k_3 , т.е.:

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \approx \frac{M}{M_{\text{ном}}} = \mu = k_3.$$

В тоже время для турбомеханизмов коэффициент загрузки является функцией относительной частоты: $k_3 = \alpha^2$

С учетом принятых допущении суммарные потери в частотно-регулируемом СДПМ записываем:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер,1}} = \Delta P_{\text{пост,ном}} \alpha^2 + \Delta P_{\text{пер,1,ном}} \alpha^4 = \Delta P_{\text{пер,1,ном}} \alpha^2 \left(\frac{\Delta P_{\text{пост,ном}}}{\Delta P_{\text{пер,1,ном}}} + \alpha^2 \right). \quad (4)$$

Обозначим относительные постоянные потери мощности СДПМ:

$$p_0^* = \frac{\Delta P_{\text{пост,ном}}}{\Delta P_{\text{пер,1,ном}}}. \quad (5)$$

В результате получаем выражение потерь мощности в виде:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер,1,ном}} \alpha^2 (p_0^* + \alpha^2). \quad (6)$$

Общее выражение для КПД СДПМ при СЧУ для турбомеханизмов:

$$\eta_d = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{\alpha^3 P_{\text{ном}}}{\alpha^3 P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{пер,1,ном}} \alpha^2 (p_0^* + \alpha^2)} = \frac{\alpha P_{\text{ном}}}{\alpha P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{пер,1,ном}} (p_0^* + \alpha^2)}. \quad (7)$$

Разделив числитель и знаменатель на $\alpha P_{\text{ном}}$, получим выражение для КПД в виде:

$$\eta_d = \left[1 + \frac{\Delta P_{\text{пер,1,ном}}}{P_{\text{ном}}} \cdot \frac{p_0^* + \alpha^2}{\alpha} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Обозначим $\Delta P_{\text{пер,1,ном}}^* = \frac{\Delta P_{\text{пер,1,ном}}}{P_{\text{ном}}}$, тогда:

$$\eta_d = \left[1 + \Delta P_{\text{пер,1,ном}}^* \frac{p_0^* + \alpha^2}{\alpha} \right]^{-1}. \quad (9)$$

При $\alpha = 1$ имеем номинальный КПД., т.е. $\eta_d = \eta_{\text{ном}}$. При этих условиях из (9) можно найти

$$\Delta P_{\text{пер,1,ном}}^* = \frac{1}{p_0^* + 1} \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right)$$

и записать окончательное выражение для КПД СДПМ при СЧУ для турбомеханизмов:

$$\eta_d = \left[1 + \frac{1}{p_0^* + 1} \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \frac{p_0^* + \alpha^2}{\alpha} \right]^{-1}. \quad (10)$$

1. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 287–298.

КОНКУРСНАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ КРЕАТИВНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Алисеенко Д.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы в качестве ключевого двигателя инновационных процессов по траектории устойчивого прогрессирования выделяет «креативный класс» [1, с. 12]. К обозначенной категории принадлежат инженеры по автоматизации и робототехнике как специалисты, разрабатывающие и внедряющие в промышленную сферу высокотехнологичные продукты и услуги Индустрии 4.0. Подобные специалисты должны обладать инновационной ориентированностью и высоким уровнем сформированности креативной компетентности.

Под креативной компетентностью будущего специалиста в сфере инженерии подразумевается динамичное интегративное личностно-профессиональное качество, которое эксплицируется в способности мотивированно и ответственно решать широкий круг инженерных задач для обеспечения процессов устойчивого развития. При этом отличительными характеристиками продуктов профессиональной деятельности становятся новизна, оригинальность и социальная значимость.

Вектор государственной политики Республики Беларусь направлен на усиление значимости креативно-ориентированных специалистов, поэтому в качестве основных задач инновационного становления отраслей экономики отмечается модернизация процесса профессиональной подготовки инженерных кадров, которые, развивая высокотехнологичные производства, формируют VI технологический уклад [1, с. 15].

В свете вышесказанного интеграция образовательного и исследовательского процессов становится неотъемлемым фактором развития креативной компетентности будущих инженеров. Одним из эффективных механизмов формирования креативной личности будущих специалистов является их активное вовлечение в научно-исследовательскую деятельность, в том числе конкурсную, которая воплощается в различных видах междисциплинарных интеллектуальных соревнований, республиканских и международных конкурсах научных работ. Следует подчеркнуть целесообразность модернизации конкурсной деятельности посредством введения новых ее видов (интеллектиада, челлендж, креативиада и др.) и форм реализации (командная, индивидуальная, двуплановая и др.) [2, с. 21-22].

На нынешнем этапе становления образования конкурсная научно-исследовательская деятельность предполагает не только выявление и поощрение талантливых обучающихся, но и развитие компетенций, востребованных в сфере будущей профессии. При этом совершенствование системы образования способствует расширению форм и содержания конкурсной деятельности, наполняя ее междисциплинарным контекстом и открывая участникам возможность дистанционно демонстрировать свои знания, умения и навыки на международных научных конкурсах.

В осеннем семестре 2024/2025 учебного года автор выступил научным руководителем 20-и студентов третьего курса автотракторного факультета Белорусского национального технического университета (далее – БНТУ) и 6-и студентов первого курса факультета информационных технологий и робототехники БНТУ. Каждый из этих обучающихся в течение семестра принял участие в двух международных конкурсах (Российская Федерация) в соавторстве с одним или двумя студентами.

При этом будущие транспортные инженеры (третий курс) предъявили на различные международные конкурсы 9 статей, выполненных под научным руководством автора, из них 8 были отмечены Дипломами 1-й степени, 1 – Дипломом 2-й степени.

Будущие специалисты по автоматизации и робототехнике (первый курс) представили в рамках международных конкурсов 6 статей, воплощенных под научным руководством автора, 5 из которых были награждены Дипломами 1-й степени, 1 – Дипломом 2-й степени. Следует подчеркнуть, что Диплом 2-й степени был получен студентами-соавторами при их дебютном участии в международном конкурсе, последующее же участие было отмечено самой высокой наградой – Дипломом 1-й степени.

Аналогичная ситуация наблюдалась и у студентов автотракторного факультета БНТУ, что свидетельствует о повышении уровня компетенций обучающихся в процессе конкурсной деятельности.

Постоянное участие студентов в республиканских и международных конкурсах будет способствовать развитию креативного инженерного мышления, при котором объект исследования рассматривается с различных исследовательских позиций, что дает возможность будущим специалистам преодолеть в дальнейшем инертность традиционных подходов при разработке инженерных продуктов нового поколения.

1. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://belisa.org.by/pdf/2022/gpir_2021-2025_22.pdf. – Дата доступа: 01.02.2025.
2. Алисеенко, Д. С. «Зеленая» креативиада как инструмент формирования креативной компетентности инженеров новой формации / Д. С. Алисеенко // Управление образованием: теория и практика. – 2023. – Т. 13. – № 10-1. – С. 19–29.

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Барышев А.А., Лозичный А.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Киберфизические системы представляют собой интеграцию вычислительных ресурсов, сетей и физического мира. Киберфизическая система подразделяется на датчики, программное обеспечение и физические компоненты для взаимодействия и обмена данными для автоматизации, мониторинга и управления. Эти системы находят применение в самых различных областях, таких как промышленность, транспорт, здравоохранение и городское хозяйство и является ведущим звеном в концепции “Индустрия 4.0”.

На сегодняшний день киберфизические системы активно развиты в капиталистических странах, таких как Германия, Япония и США. В этих странах реализуются проекты, направленные на создание умных городов, эффективные системы управления транспортом и автоматизацию производственных процессов без внешнего вмешательства человека.

Несмотря на очевидные преимущества, Республика Беларусь сталкивается с рядом проблем, препятствующих развитию киберфизических систем. Основные причины включают недостаток финансирования, ограниченные инвестиции в научные исследования и разработки, а также дефицит квалифицированных специалистов в области информационных технологий и автоматизации. Кроме того, низкий уровень цифровизации экономики также тормозят внедрение киберфизических систем.

Поэтому для реализации потенциала киберфизических систем необходимо принять ряд стратегических мер. Во-первых, следует разработать национальную стратегию по внедрению киберфизических систем, учитывающую опыт стран, добившихся успеха в этой области. Это может включать создание инновационных кластеров, поддерживающих стартапы и НИОКР, а также формирование благоприятного инвестиционного климата, способствующего привлечению иностранных инвестиций.

Также следует обратить внимание на создание пилотных проектов в крупных городах Беларуси, таких как Минск и Гомель, которые могут служить примером для дальнейшего масштабирования и внедрения киберфизических систем в других регионах страны. Опыт Сингапура и Южной Кореи показывает, что успешное внедрение киберфизических систем возможно при активной государственной поддержке и сотрудничестве между различными секторами экономики.

ВЫБОР РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМИ ЗАПАСАМИ

Баяманова А., Ковалева И.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В условиях стремительного роста объемов данных и необходимости оперативного принятия решений традиционные методы складского учета становятся менее эффективными. Одним из ключевых направлений в данной области является разработка WEB-приложений, способных объединять различные модули логистики в единую цифровую экосистему.

При проектировании модульной WEB-системы для управления складскими запасами важную роль играет интеграция различных логистических компонентов. Это включает прием и обработку заказов, отслеживание движения товаров, учет складских остатков и прогнозирование спроса.

В настоящее время существует множество различных методов управления складскими запасами, которые применяются компаниями. На первом этапе разработки системы было принято решение об использовании ABC и XYZ-анализа. Стратегия ABC подразумевает учет при заказе приоритетности товарных групп, в зависимости от их доли в общем объеме продаж. А XYZ-анализ предполагает учет динамики спроса и готовности покупателя ожидать поставки продукции при её отсутствии. Для анализа розничной торговли достаточно этих методов. Для крупных компаний будут реализованы более сложные методы.

Был проведен анализ существующих решений и выбрана микросервисная архитектура, что позволило обеспечить гибкость и масштабируемость системы. В качестве технологической базы использовались современные WEB-фреймворки (React, Node.js), REST API для взаимодействия с внешними сервисами, а также облачные технологии для централизованного хранения данных. Для реализации точного и оперативного учета товаров были внедрены технологии Интернета вещей (IoT) и автоматизированной идентификации (QR-коды, штрих-коды). Это позволило организовать мониторинг перемещения товаров, учитывая такие операции как отбор, приёмка, отгрузка, размещение и т.д. и минимизировать ошибки при складских операциях.

Для работы с QR-кодами предлагается использовать open-source библиотеку ZXing, которая выделяется своей мультиплатформенностью. Библиотека ZXing служит важным инструментом для внедрения QR-кодов в процессы идентификации и аутентификации, способствуя развитию технологий и упрощению взаимодействия между пользователями и сервисами.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КАБИНЫ ЛЕСНОЙ МАШИНЫ

**Бородуля А.В.¹, Напрасников В.В.¹,
Кункевич Д.П.¹, Соловьев А.Н.²**

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

Целью проекта является создание программной реализации для исследования каркаса кабины лесной машины, который обеспечивает безопасность и защиту водителя в случае падения какого-либо тела на верхнюю часть кабины.

Для проведения анализа используем средство Explicit Dynamics в Ansys Workbench. ANSYS Explicit Dynamics позволяет решать все основные задачи явной динамики и быстропротекающих процессов со сложными контактными взаимодействиями, в том числе ударопрочность.

Построение геометрической части модели выполнено в среде SpaceClaim с использованием макроса на языке Python, с записью действий на основе Skript Editor. Фрагмент скрипта представлен на рисунке 1.

```
1 # Python Script, API Version = v17
2
3 # Sketch Rectangle
4 plane = Plane.PlaneZX
5 result = ViewHelper.SetSketchPlane(plane)
6 point1 = Point2D.Create(MM(-10),MM(0))
7 point2 = Point2D.Create(MM(10),MM(0))
8 point3 = Point2D.Create(MM(10),MM(20))
9 result = SketchRectangle.Create(point1, point2, point3)
10 # EndBlock
11
12
13 # Sketch Line
14 start = Point2D.Create(MM(10), MM(0))
15 end = Point2D.Create(MM(4.61531381036696), MM(-14.0001:
16 result = SketchLine.Create(start, end)
17 # EndBlock
18
19 # Sketch Line
20 start = Point2D.Create(MM(-10), MM(-14))
21 end = Point2D.Create(MM(-4.62), MM(-14))
22 result = SketchLine.Create(start, end)
23 # EndBlock
24
25 # Sketch Line
26 start = Point2D.Create(MM(-4.62), MM(-14))
27 end = Point2D.Create(MM(-10), MM(0))
28 result = SketchLine.Create(start, end)
```

Рисунок 1. Фрагмент скрипта

На рисунке 2 слева показано дерево проекта с указанием скорости движения бревна, ударяющего по каркасу, фиксации опорных частей конструкции и контактов между телами (слева) и конечно-элементная расчетная схема (справа).

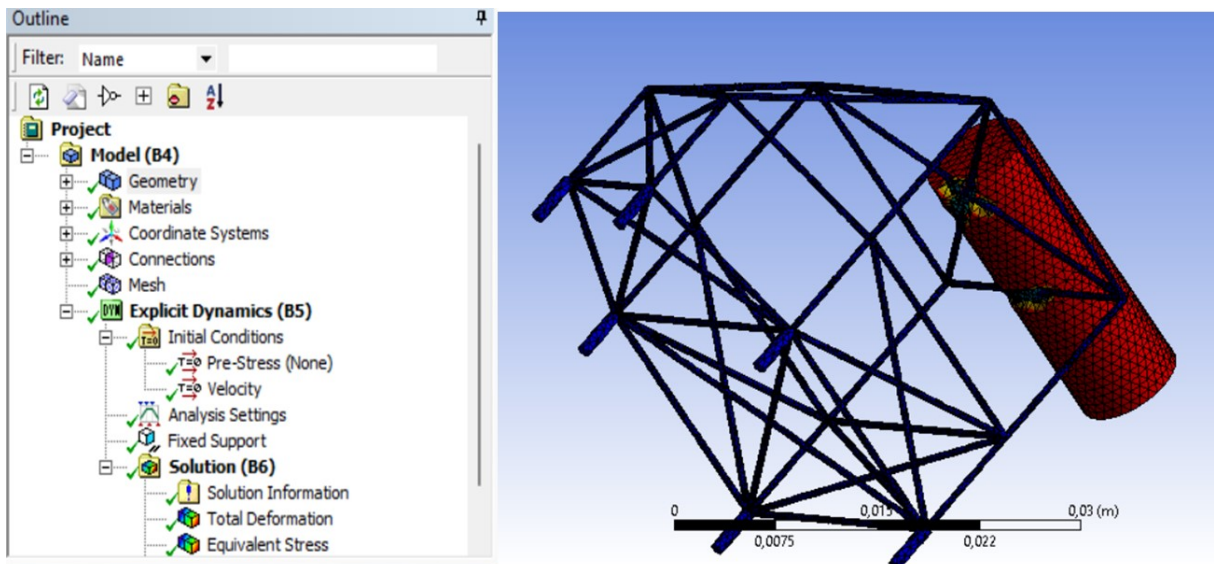


Рисунок 2. Расчетная конечно-элементная схема

При численном исследовании на основе блока Response Surface Optimization получены аппроксимирующие поверхности для массы изделия и максимума эквивалентного напряжения, представленные на рисунке 3.

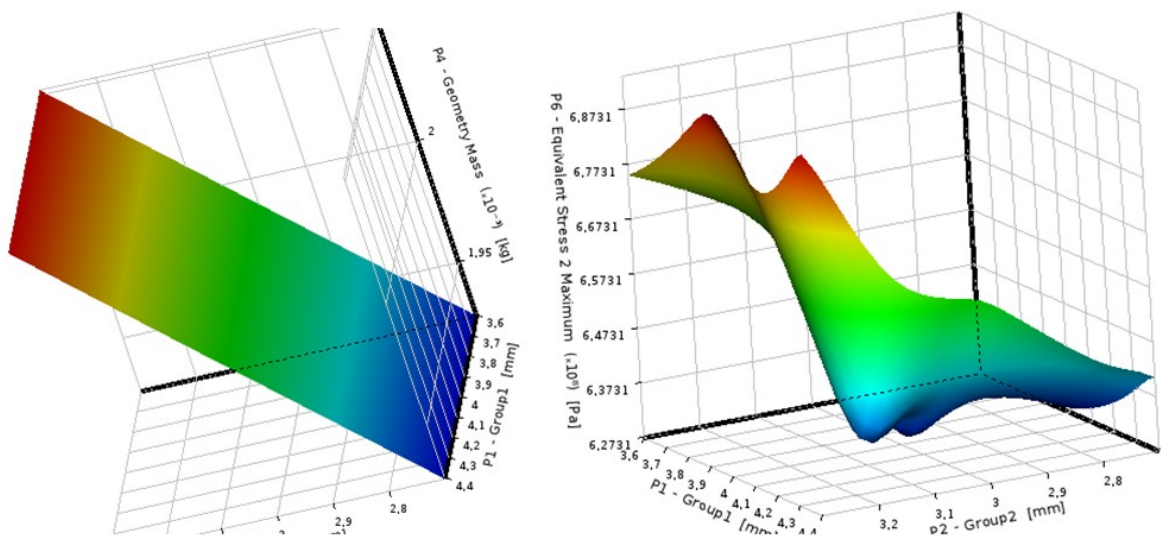


Рисунок 3. Влияние входных параметров на массу (лева) и на напряжения в материале (справа).

В результате выполнения данной работы создана методика проектирования кабина лесной машины и проведен ее структурный анализ с целью оптимизации данной модели. Было выполнено исследование различных вариантов конструкции кабины и ее составляющих деталей с целью повышения безопасности человека-оператора, комфорта и эргономичности.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ГРАФАХ НА ОСНОВЕ MATLAB

**Бородуля А.В.¹, Напрасников В.В.¹,
Кункевич Д.П.¹, Соловьев А.Н.²**

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

Целью настоящей работы является создание автономного программного обеспечения для решения задач моделирования на графах на основе MATLAB.

В докладе подробно описываются этапы подготовки выполняемого файла, который строится по созданным в MATLAB функциям, предназначенным для работы с графами, предварительно подготовлены на языке программирования среды MATLAB.

Часто возникает ситуация, когда пользователю нужно решить различного рода задачи с использованием MATLAB. При этом приходится устанавливать эту программу, которая требует очень большого пространства на жестком диске и наличия лицензии.

Существует другая возможность, которая основана на использовании приложения MATLAB Runtime. MATLAB Runtime является автономным набором разделяемых библиотек, кода MATLAB и других файлов, который включает выполнение файлов MATLAB на компьютерах без установленной версии MATLAB.

Для того чтобы скомпилировать автономное приложение в MATLAB сначала нужно открыть скрипт с программой. Программа должна быть представлена функцией. При компиляции приложений используется MATLAB Compiler, который позволяет преобразовать скрипты и функции MATLAB в исполняемые файлы, доступные для работы. На рисунке 1 представлен процесс компиляции.

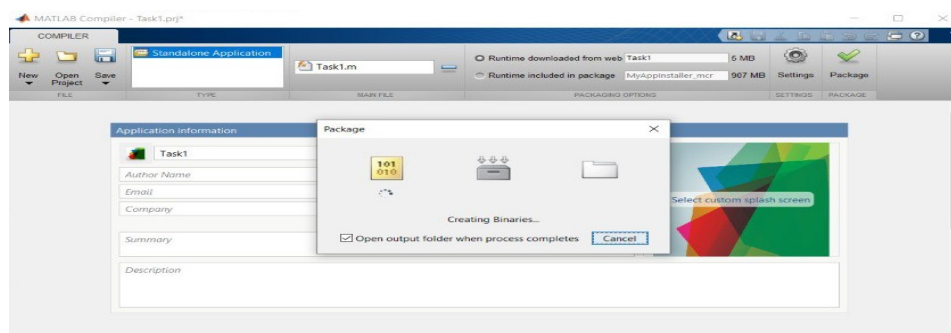


Рисунок 1 – Настройка процесса компиляции.

Для запуска исполняемого файла на другом компьютере без установленного на нем MATLAB сначала нужно установить MATLAB Runtime, запустив файл MCRInstaller.exe. Если на компьютере установлен MATLAB, то установка MATLAB Runtime не требуется. Для корректной работы нужно чтобы путь к исполняемым файлам не содержал в себе кириллических символов.

Этот подход использован для создания приложения, позволяющего решать некоторые задачи (рисунок 2) на графах, в том числе:

- визуализация графа, орграфа, графа со взвешенными ребрами, графа со взвешенными вершинами;
- задача о кратчайшем пути между любыми вершинами;
- задача о максимальном потоке;
- задача о максимальном паросочетании;
- задача о минимальном вершинном покрытии.

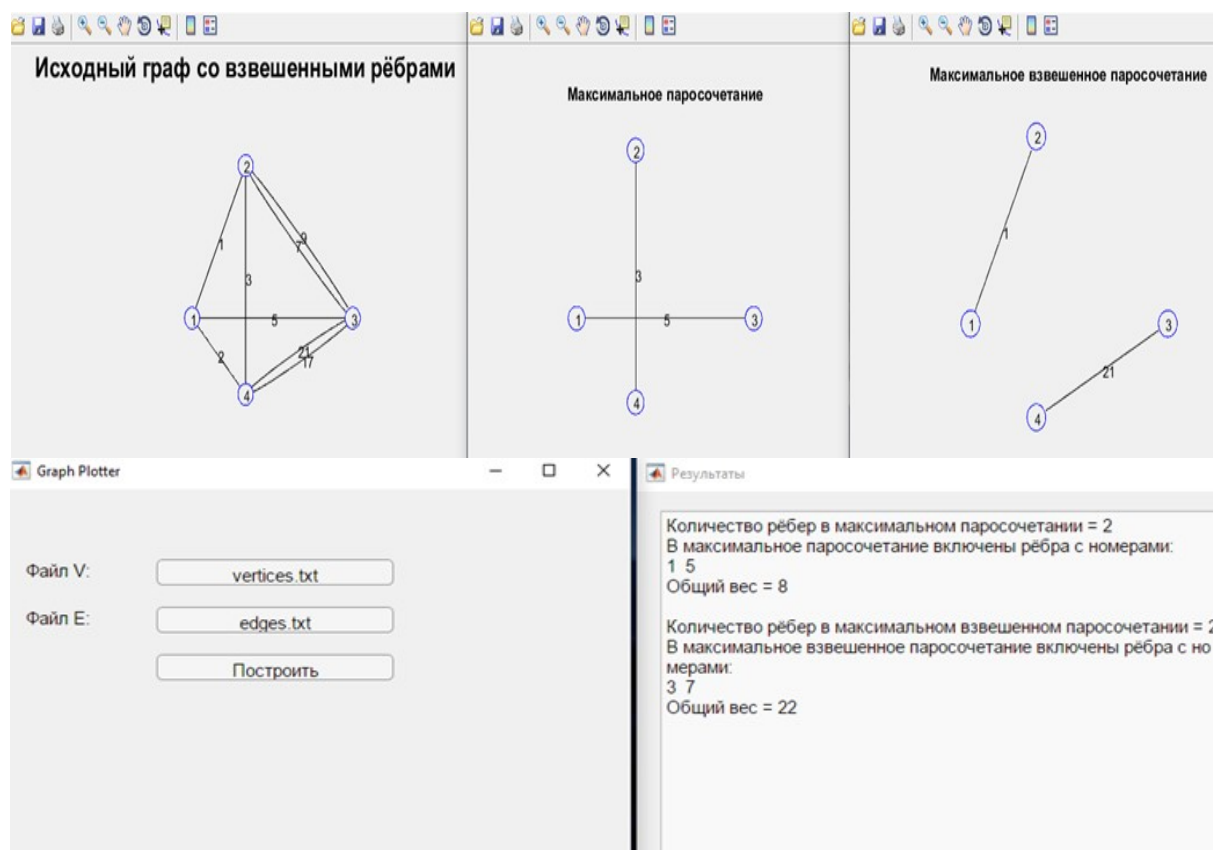


Рисунок 2. Примеры решения задач

ВЫВОД. Использование описанного подхода позволяет:

- существенно сократить объем данных на жестком диске с 32 гигабайт, необходимых для установки MATLAB до 2 гигабайт используемых для решения обсуждаемой задачи;
- не требует приобретения лицензии для конечного пользователя.

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И НЕОДИМОВЫЕ МАГНИТЫ

Брель В.В.

Гомельский государственный технический университет имени
П.О.Сухого, Гомель, Республика Беларусь.

Асинхронный двигатель с электромагнитным тормозом обладает низкой стоимостью, высокой надежностью, малой мощностью управления, облегчает автоматизацию различных процессов и режимов работы оборудования.

Существующие конструкции обладают рядом недостатков: пониженная износостойкость фрикционных накладок тормоза (требуют частой регулировки, смены тормозных накладок), не обеспечивают плавности торможения и в ряде случаев рассчитанную конструкцию невозможно встроить в базовый АД без удлинения его вала [1].

Применяя в конструкции силового электромагнита постоянные магниты можно уменьшить его габариты при заданных тяговых усилиях.

В настоящее время в электродвигателях получили широкое распространение неодимовые магниты, обладающие большим усилием и небольшими габаритами.

Задача проектного расчета силового электромагнита электромагнитного тормоза состоит в том, чтобы рассчитать конструкцию и размеры применяемых неодимовых магнитов, которые позволят использовать часть магнитного потока для создания тягового усилия и тем самым снизить габариты и потребление энергии всей конструкции силового электромагнита.

При расчете и проектировании магнитной системы силового электромагнита, как показывает анализ уравнений, большое значение также имеет выбор и расчет оптимальных значений следующих параметров: активный диаметр якоря; активная длина якоря, количество зубцов-полюсов неодимовых магнитов; абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника и др.

Кроме инженерных расчетов автор пользовался методом конечных элементов, что позволило спроектировать оптимальные конструкции силового электромагнита тормоза. Это позволило улучшить конструкцию асинхронного двигателя с электромагнитным тормозом по массогабаритным показателям.

1. Соленков, В.В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты. / В.В. Соленков, В.В. Брель // «Энергетика: Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» Минск, БНТУ, 2011 № 6. с. 20-26.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Васильев С. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Переход электропривода от одного установившегося режима к другому сопровождается переходным процессом, на который затрачивается энергия, которую можно представить в виде двух составляющих: полезной, связанной с выполнением электродвигателем определённой механической работы, и потерь энергии.

Полезная составляющая определяется изменением произведения момента двигателя на его скорость. При этом в пусковых режимах, связанных с увеличением скорости двигателя, энергия из сети расходуется на увеличение кинетической энергии движущихся частей электропривода, а в тормозных, наоборот, кинетическая энергия движущихся частей электропривода возвращается в сеть (при рекуперативном торможении) или выделяется в виде потерь (при динамическом торможении или торможении противовключением). Полезная составляющая энергии определяется технологическим процессом и в пусковых режимах повлиять на нее не представляется возможным, а в тормозных режимах она может быть возвращена в сеть за счет рекуперативного торможения.

Потери энергии обычно делят на постоянные и переменные. Под постоянными подразумеваются потери энергии, не зависящие от нагрузки двигателя - потери в стали магнитопровода двигателя, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Постоянные потери зависят от скорости двигателя, амплитуды и частоты питающего его напряжения и т.д. Но так как эти потери составляют незначительную часть общих потерь, то они принимаются неизменными и равными постоянным потерям при номинальном режиме работы двигателя. Наибольший интерес с точки зрения оптимизации энергопотребления представляют переменные потери электропривода, которые складываются из мощности потерь в меди статора и ротора двигателя:

$$\Delta P_M = \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2.$$

При Г-образной схемы замещения потери в меди статора

$$\Delta P_{1M} = 3I_2'^2 R_1 = 3I_2'^2 R_2' \frac{R_1}{R_2'} = \Delta P_{2M} \frac{R_1}{R_2'},$$

а суммарные потери в меди

$$\Delta P_M = \Delta P_{2M} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$$

Тогда потери энергии за время переходного процесса $t_{n.n.}$

$$\Delta W_M = \int_0^{t_{n.n.}} \Delta P_M(t) dt.$$

Более удобные расчетные соотношения могут быть получены при использовании механических переменных и параметров. Используя известное соотношение для переменных потерь в роторе

$$\Delta P_{2M} = 3I_2'^2 R_2' \approx M \omega_0 S,$$

найдем энергию потерь в роторе за время переходного процесса:

$$\Delta W_{2M} = \int_0^{t_{n.n.}} M(t) \omega_0 S(t) dt.$$

Заменив пределы интегрирования, получим [1]:

$$\Delta W_{2M} = \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} M(t) \omega_0 S(t) \left[-\frac{J \omega_0}{M(t)} \right] dS = -J \omega_0^2 \int_{S_{нач}}^{S_{кон}} S dS = J \omega_0^2 \frac{S_{нач}^2 - S_{кон}^2}{2}. \quad (1)$$

Формула (1) удобна для определения потерь энергии, так как для расчетов необходимо знать лишь параметры J и ω_0 , а также начальное и конечное значения скольжения S .

Время пуска и торможения под нагрузкой $M_c \neq 0$ (снижением скорости в установившемся режиме пренебрегаем)

$$t_{n.n.} = \frac{J \omega_0}{M \pm M_c}.$$

При $M = const$ время пуска и торможения в холостую $t_{n.n.0} = J \omega_0 / M$.

Потери энергии в переходном процессе можно рассчитать по формуле

$$\Delta W_{2M} = \frac{J \omega_0^2}{2} (S_{нач}^2 - S_{кон}^2) \frac{t_{n.n.}}{t_{n.n.0}}. \quad (2)$$

Анализ формул (1) и (2) позволяет назвать два основных способа снижения потерь энергии в переходных режимах: 1) уменьшение суммарного момента инерции электропривода; 2) регулирование в переходных процессах скорости идеального холостого хода, т.е. использование управляемых переходных процессов. Эти способы эффективны для электроприводов с частыми пусками и торможениями (кранов, лифтов, манипуляторов и т.д.).

Способы уменьшения момента инерции электропривода: 1) использование малоинерционных двигателей; 2) рациональное конструирование механической передачи (выбор оптимального передаточного числа редуктора и т.д.); 3) замена одного двигателя двумя и более с сохранением суммарной мощности. Как правило, суммарный момент инерции двух двигателей половинной мощности оказывается меньше момента инерции одного двигателя полной мощности в рамках одной серии двигателей.

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш. Энергосберегающий асинхронный электропривод - М.: АСАДЕМА, 2004. – 202с.

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИЕЙ

Вашкевич И.С., Гутич И.И.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

В современных условиях развития энергетических систем дистанционный контроль и управление трансформаторными подстанциями становится ключевым инструментом обеспечения стабильности и устойчивости электросетей. Развитие информационных технологий привело к внедрению на предприятиях электроэнергетики большого количества автоматизированных систем (АС), предназначенных, как правило, для решения только одной конкретной технологической задачи. Большинство таких АС имеют свою собственную информационную модель энергетической системы или её части и собственный формат хранения. При этом взаимная конвертация информационных моделей разных АС реализуется точно и частично. Таким образом несмотря на то, что информационные модели разных АС содержат данные об одном и том же оборудовании, информационный обмен между ними затруднителен. Для решения этих проблем предлагается использовать цифровую модель трансформаторной подстанции, что позволит выполнять дистанционный контроль и управление трансформаторной подстанцией высокого напряжения с использованием SCADA.[1]

Принятие стандарта ГПО «Белэнерго» СТП 33240.01.108-22 «Определение единой информационной модели электрической сети в сочетании с единой системой идентификации объектов модели и единой системой управления нормативно-справочной информацией» стало стартом по созданию в Белорусской энергосистеме единой информационной модели сети на основе общей информационной модели с учетом требований стандартов МЭК 61970 / 61968. В стандартах МЭК 61970 и 61968 описывается общая информационная модель – это стандартизованная модель информационного взаимодействия предприятий электроэнергетики, предоставляющая возможность интеграции разнородных автоматизированных систем и обеспечивающая унифицированный способ управления независимо от назначения и производителя оборудования. Таким образом, для создания единой информационной модели в семантике CIM используется разработанная АО «Оператор АСТУ» (входит в состав Группы «Россети», Российская Федерация) программная платформа PC-20, а в качестве системы управления и сбора данных (SCADA) используется программное обеспечение СК-11. [2]

«СК-11» – это общее название информационно-технической платформы с изменяемым набором приложений для создания

автоматизированных систем оперативно-диспетчерского, технологического и ситуационного управления объектами электроэнергетики.

СК-11 представляет собой новое поколение автоматизированных систем управления производством, передачей и распределением электроэнергии, систем управления ремонтами и эксплуатацией, систем управления отказами, систем подготовки оперативного персонала энергосистем.

Основываясь на электрическую схему высоковольтной подстанции, начинается процесс создания цифровой модели в программном комплексе. В программном обеспечении имеется множество элементов, которые позволяют изобразить все в максимальной точности с электрической схемой.

Пример смоделированной отходящей линии. Рис.1.

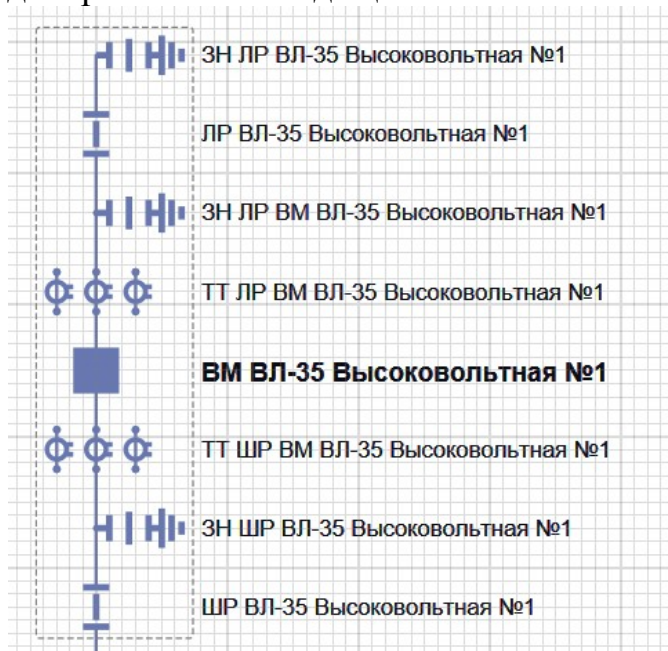


Рисунок 1 – Смоделированная высоковольтная линия 35кВ

Следующим этапом после завершения моделирования является создание телемеханики. Телемеханизация позволяет собирать, передавать информацию о функционировании объектов электрической сети, а также передавать команды диспетчерского управления обозначенным объектам. В состав телемеханики входят: телеизмерение (получение информации о значениях измеряемых параметров напряжения, тока, давления и др.), телесигнализации (получение информации о состоянии контролируемых и управляемых объектов) и телеуправления (управление объектом на расстоянии посредством передачи электрических или радиосигналов).

Работа системы телеуправления и телесигнализации основана на двоичном коде «0» и «1». Одно из значений присваивается положению выключателя. Данное значение поступает через передатчик, который имеет подключение к каналу связи. В большинстве случаев получаемых

данных не хватает для полной и объективной оценки состояния энергетической системы, поэтому информирование о состоянии функционирования коммутационных аппаратов системы ложится на телесигнализацию, которая поступает на пульт дежурного диспетчера. Стоит отметить, что телеуправление не может работать без сигнала телесигнализации.

Например, по завершению настройки телеуправления, однопозиционного коммутационного аппарата в виде выключателя, он имеет 2 состояния: при “1” - Включено и при “0” - Отключено. Также на Рис.2. можно увидеть, как будет изменяться состояние коммутационного аппарата при передаче того или иного сигнала.



Рисунок 2 - Состояние выключателя при передаче “1” и “0”

В конечном результате получается созданная цифровая модель и телеметрия для нее. Это дает возможность на расстоянии собирать и передавать необходимую информацию о том, как функционируют элементы сети, а также управлять ими из диспетчерской с помощью команд. Телемеханизация позволяет оперативно ликвидировать неисправности и аварии, а также всегда контролировать состояние элементов системы. Дистанционное управление позволяет уменьшить число персонала, находящегося на объекте и выявлять проблемы на раннем этапе. Таким образом созданная модель позволит эффективно и надежно управлять высоковольтной трансформаторной подстанцией, что обеспечит стабильность и эффективность электроснабжения.

1. Создание единой информационной модели Белорусской энергосистемы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.energo.by/content/infocenter/news/sozdanie-edinoy-informatsionnoy-modeli-belorusskoy-energositemy__12385/
2. Создание цифровых информационных моделей. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/future_plan/presentations/present_cim290923.pdf

ПОВЕДЕНИЕ ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ ДРОНА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТА

Вельченко А.А., Павлюковец С.А., Радкевич А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В последнее время, с быстрым развитием автономных систем, изучение мобильных летающих роботов стало одной из самых горячих тем сегодня. Беспилотные системы, состоящие из беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), беспилотных наземных систем (БНС), беспилотных морских платформ (БМП) и беспилотных космических систем (БКС), имеют большой потенциал как в военных, так и в гражданских целях. Среди них БПЛА играют особо важную роль, так как имеют широкий спектр применения в таких областях, как аэрофотосъемка, лесное хозяйство, транспорт, ликвидация последствий стихийных бедствий, ретрансляция связи, отслеживание диких животных, городской мониторинг, картографирование, проверка электроснабжения, сельское хозяйство, геологическая разведка и пограничный контроль.

Пробки на дорогах являются проблемой, с которой приходится сталкиваться крупным городам из-за ограничений современных транспортных средств. Существует острая необходимость в новых видах транспорта для решения этой проблемы. Технология пилотируемых дронов имеет естественное преимущество в работе со сложными городскими средами, поскольку она может полностью использовать полетное пространство, игнорировать сложные городские здания и быстро достигать пункта назначения. Это хорошее решение для текущей загруженности дорог в городах. При проектировании БПЛА актуальным является решение задач безопасного пилотирования в следствии управления пилотируемыми дронами, где необходимо детальное изучение поведения винтомоторной группы дрона. В связи с чем в данной работе показана взаимосвязь управления с динамическими характеристиками электродвигателей.

Исследование динамических характеристик электродвигателей (рисунок 1) проводилось на основании полученных полетных данных используя инструмент Blackbox Explorer, который позволяет просматривать и анализировать массив данных, созданный функцией Blackbox Cleanflight и Betaflight.

Перемещение в пространстве осуществляется за счет изменения скорости вращения пропеллеров. Логика управления тягой электродвигателей для изменения движения поясняется при помощи больших стрелок, обозначающих увеличение скорости, а маленьких – ее уменьшение.

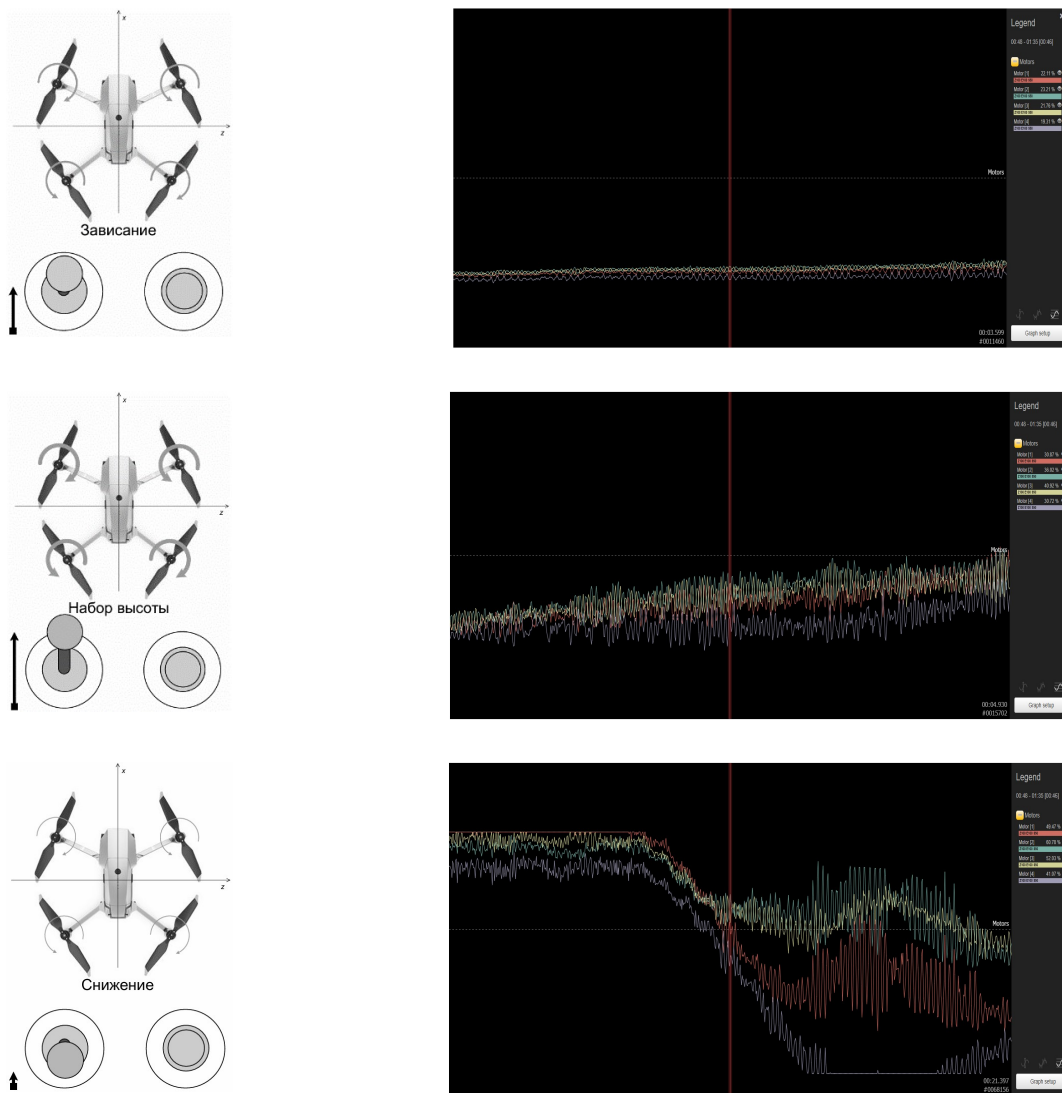


Рисунок 1

Таким образом из рисунка 1 можно видеть, что присутствуют колебания по углам крена и тангажа, возникшие при особом движении вектора тяги.

1. Гэн К., Чулин Н.А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера. Наука и образование, 2015, № 5. DOI: 10.7463/0515.0771076
2. Schollig A., Augugliaro F., Lupashin S., D'Andrea R. Synchronizing the Motion of a Quadcopter to Music. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010, pp. 3355–3360.
3. Жильцов А.И., Жуков К.С., Рылеев Д.А., Черничкин А.А., Чулин Н.А., Юдин А.Е. Технология разработки системы управления полетом для беспилотного летательного аппарата с помощью геометрического метода. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 2 (14). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-2-522

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА ЛЭП С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Воюш Н.В., Сухобоков А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Задача оперативного выявления неисправностей на линиях электропередач представляет собой одну из важнейших для бесперебойной работы энергетических систем. Ручные осмотры столбов ЛЭП требуют значительных затрат времени и привлечения квалифицированных специалистов в полевых условиях. С целью оптимизации и упрощения мониторинга разработан вариант автоматизации, основывающийся на нейронных сетях, способных выявлять дефекты изоляторов и несоответствия в элементах крепления. Такое решение не только повышает точность проверок, но и снижает затраты, увеличивая надежность электроснабжения. Предлагается использовать предобученную модель для обнаружения объектов-дефектов на фотографиях опор, полученных в результате съемок отдельных линий.

Данные для обучения были собраны на основе фотографий, сделанных в ходе облетов трех линий электропередач Центром промышленных беспилотных решений Copter.by. В итоге было получено около 4500 изображений в высоком разрешении (5280×3956), каждую опору снимали с четырех различных ракурсов. Разметка выполнялась вручную с использованием инструмента LabelImg [1]. Для каждого изображения были выделены следующие отметки:

Изоляторы – с тремя видами дефектов (скол, загрязнение, трещина) и без дефектов (два вида исполнения).

Элементы крепления (вязка) – корректная, отсутствующая или неправильная.

Опоры – как сложные, так и одностоечные (в качестве дополнительного объекта).

В качестве детектора была выбрана модель YOLOv11[2]. Данный подход ориентирован на высокую скорость обработки и удобство интеграции в реальные системы, что позволяет эффективно работать с большими объемами данных. Настройка параметров производилась с учетом доступных вычислительных мощностей. Для обучения использовалось 10 эпох, размер мини-батча – 4. Фотографии были разделены на «тайлы» размером 1024×1024 с помощью инструмента SANI[3] (Slicing Aided Hyper Inference) – утилиты, которая автоматизирует процесс нарезки крупных изображений на квадраты определённого размера, что упрощает обучение и улучшает точность детекции мелких объектов. Валидационная выборка (1000 изображений) была отделена от обучающей, для объективной оценки работы модели. Оценка качества

проводилась по основным метрикам: precision, recall, mAP@50 и mAP@50-95 на основе результатов обучения (Рис. 1)

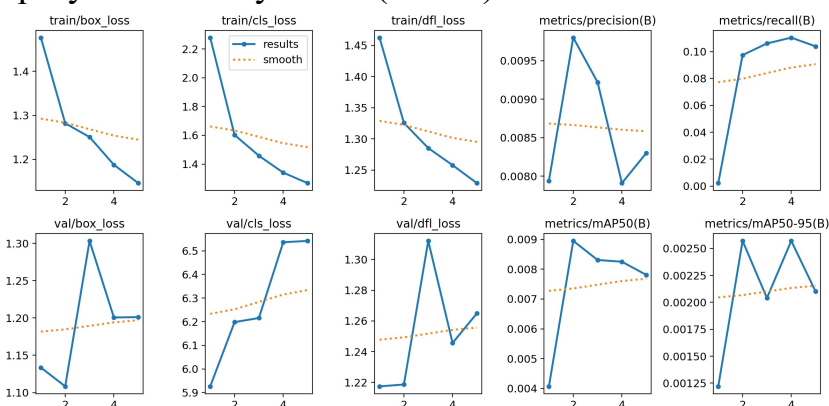


Рис. 1 Метрики оценивающие процесс обучения, представленные в виде графиков

Потери на тренировочной выборке снижаются, что указывает на прогресс в обучении. На валидационной выборке тем не менее также присутствуют колебания, характерные для начальных этапов обучения, хотя в целом наблюдается тенденция к снижению. Precision и Recall пока имеют невысокие и нестабильные показатели, но наблюдается положительная динамика роста. Recall. mAP (как на уровне 0.5, так и среднее mAP@50-95) начинает плавно расти от почти нулевых значений к более высоким, что говорит о том, что модель постепенно учится успешно идентифицировать объекты нужных классов.

Предлагается следующая интеграция в рабочий процесс: осуществить плановый облёт необходимой для мониторинга линии электропередач. Полученные изображения передать модели для детекции, а результаты выборки отправить специалистам на подтверждение или опровержение наличие дефектов.

Предварительные результаты демонстрируют, что использование модели YOLOv11 для автоматического обнаружения дефектов на линиях электропередач имеет потенциал для создания полноценной системы мониторинга. Наблюдаемая тенденция улучшения показателей с возрастанием количества эпох обучения говорит о перспективах метода. В будущем планируется расширение процесса обучения на полный объем данных, увеличение функционала системы, а именно внедрение сегментации и реализации "дообучения" на новых обработанных данных и более глубокая валидация совместно со специалистами. Такой подход существенно сократит время и расходы на инспекции, сделав эксплуатацию и обслуживание ЛЭП более эффективными и безопасными.

1. LabelImg [Электронный ресурс] – URL: <https://github.com/HumanSignal/labelImg> (дата обращения 1.02.2025)
2. YoLov11 документация [Электронный ресурс] – URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/models/>

ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИКОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ БЕСКАНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ КРС

Гируцкий И.И.,¹ Сеньков А.Г.,² Немирович С.И.¹

1). Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Республика Беларусь;

2). ГП «Центр радиотехники НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь;

При работе с животными в сельском хозяйстве нужно не только знать технологию выращивания, но и без вреда для животного контролировать параметры жизнедеятельности. Одним из таких параметров у КРС является масса, которую необходимо измерять и оценивать на всех этапах взросления, как у молодняка, так и у взрослых особей. Определение живой массы проводят систематически от рождения животного до случного возраста. Животных старше двух лет взвешивают два раза в год.[1] Каждое измерение массы коровы традиционными механическими весами является для неё стрессовым состоянием. Стресс может снизить массу коровы на 10-18%. Измерение массы такими способами трудоемки и трудозатратны. Поэтому необходимо применять дистанционные измерения, которые не вызывают стресса у животных и позволяют контролировать живую массу ежедневно. Для более точного контроля необходимо составить требования к оптоэлектронной системе для бесконтактного измерения массы КРС.

Опытным путем было установлено, что для получения точных данных животное должно стоять в профиль на расстоянии от 2 до 4 метров от объектива камеры. Также необходимо оценить погрешность измерения линейных промеров по пиксельному изображению для используемой камеры.

Результат – преобразование трехмерных координат точек мировой системы координат в пиксельные координаты изображения – имеет вид:

$$\begin{bmatrix} {}^c P_x \\ {}^c P_y \\ {}^c P_z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^v_w \mathbf{T}_{4 \times 4} \cdot \begin{bmatrix} {}^w P_x \\ {}^w P_y \\ {}^w P_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} {}^s I P_r \\ {}^s I P_c \\ s \end{bmatrix} = {}^I_F \mathbf{T}_{3 \times 3} \cdot {}^F_C \mathbf{T}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} {}^c P_x \\ {}^c P_y \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -1/d_y & 0 \\ 1/d_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/d_y & 0 \\ 1/d_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Отсюда получается, что масштабирующий множитель в выражении (1) равен:

$$s = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

На практике для получения матрицы камеры $\mathbf{C} = {}^I_F \mathbf{T}_{3 \times 3} {}^F_C \mathbf{T}_{3 \times 3}$ обычно выполняется процедура калибровки камеры.

Минимальные погрешности определения линейных промеров тела коровы на плоском пиксельном изображении можно считать равными половине пикселя, соответственно, по ширине и высоте:

$$\Delta^I \mathbf{P} = s \begin{bmatrix} 1/2 \\ 1/2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{s}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Соответствующие им погрешности $\Delta x = \Delta^C P_x$, $\Delta y = \Delta^C P_y$ определения линейных промеров в пространственной СК, связанной с камерой, могут быть определены на основе выражения (1) с использованием обратной матрицы камеры \mathbf{C}^{-1} :

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \Delta^I \mathbf{P}. \quad (5)$$

Для возможности оценки погрешностей Δx , Δy определения линейных промеров выразим матрицу камеры \mathbf{C} через фокусное расстояние f камеры и размеры ее пикселей d_x , d_y и найдем соответствующую обратную матрицу:

$$|\mathbf{C}| = \frac{1}{fd_x d_y}; \quad \mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & d_x & 0 \\ -d_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Тогда, погрешности Δx , Δy определения конечных точек отрезков, соответствующих линейным промерам тела коровы, могут быть оценены по формуле:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2f} \begin{bmatrix} 0 & d_x & 0 \\ -d_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2f} \begin{bmatrix} d_x \\ -d_y \\ 2f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x/(2f) \\ -d_y/(2f) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а погрешность измерения линейного промера тела коровы по цифровому фото может быть оценена по формуле:

$$\Delta L = 2\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \frac{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}{2f}, \quad (8)$$

где d_x , d_y – ширина и высота пикселя; f – фокусное расстояние камеры.

При одинаковой длине и ширине пикселя $d_x = d_y$, формула (8) упрощается:

$$\Delta L = \frac{d_x}{\sqrt{2}f}. \quad (9)$$

Кроме допустимых погрешностей, необходимо определить допустимый угол отклонения камеры от перпендикуляра по отношению к проекции животного, как по горизонтали, так и по вертикали.

1. Шляхтунов, В.И. Скотоводство: учебник / В.И. Шляхтунов, В.И. Смунов. - Мн.: Техноперспектива, 2005. – 387 с.

КОРПОРАТИВНАЯ СРЕДА ВИРТУАЛИЗАЦИИ - PROXMOX

Дербан А.Н.¹, Бусько А.М.²

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

«Дана Нетворкс»

Минск, Республика Беларусь

Proxmox [1] — это платформа управления серверами с открытым исходным кодом для корпоративной виртуализации, основанная на интеграции гипервизора KVM (Kernel-based Virtual Machine), использующего Linux Containers (LXC), и программно-определяемых функций хранения, в том числе с поддержкой инфраструктуры локальных сетей на одной платформе. Благодаря развитому веб-интерфейсу пользователя предоставляется возможность эффективного управления виртуальными машинами и контейнерами в рамках кластеров с поддержкой необходимых инструментов аварийного восстановления.

Корпоративная среда Proxmox Virtual Environment основана на Debian GNU/Linux и использует собственное ядро Linux. Исходный код Proxmox VE выпущен под лицензией GNU Affero General Public License, v3 (GNU AGPLv3), что в свою очередь позволяет свободно использовать программное обеспечение, а также по необходимости вносить свой вклад в развитие проекта.

KVM — это наиболее популярная в отрасли технология виртуализации в среде Linux операционных систем (ОС). Фактически модуль ядра ОС, который объединен с основным ядром Linux, что в свою очередь позволяет работать с высокой производительностью практически на всех аппаратных средствах семейства x86, которые поддерживают аппаратные команды виртуализации: Intel VT-x или AMD-V.

KVM может виртуализировать любые популярные ОС, например, такие как Windows и Linux\Unix, в рамках виртуальных машин (ВМ). Каждая ВМ имеет частное виртуализированное оборудование: сетевую карту, диск, графический адаптер и т. д. Запуск нескольких приложений на ВМ в одной системе позволяет существенно экономить электроэнергию и сокращать расходы, в то же время предоставляет гибкость при формировании масштабируемого центра обработки данных.

Виртуализации на основе контейнеров является более простой и легковесной альтернативой полной виртуализации вычислительных средств, т.к. позволяет разделять ресурсы ядра реальной вычислительной системы (хост-системы). LXC работает как интерфейс пользовательского пространства для управления системными прикладными контейнерами на основе развитого API (Application Program Interface) интерфейса.

1. По материалам сети Интернет, <https://www.proxmox.com>

ВИРТУАЛЬНОЕ ХРАНИЛИЩЕ VMWARE VIRTUAL SAN

Дербан А.Н.¹, Бусько А.М.²

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

«Дана Нетворкс»

Минск, Республика Беларусь

Традиционная архитектура для среды хранения и обработки данных включает в себя три ключевых компонента: 1. серверы; 2. система хранения данных (СХД); 3. сеть для обработки данных, которая соединяет СХД с серверами через блочные или файловые протоколы взаимодействия с использованием соответствующих коммутаторов. Очевидно, что развертывание такого рода решений занимает много времени, причем быстрое масштабирование в таком случае далеко не нетривиальная задача.

Конвергентная архитектура VMware Virtual SAN (VSAN) позволяет объединить в сервере вычислительные функции и функции хранения данных. В случае с VSAN каждый блок — это сервер, причем VSAN агрегирует из локальных дисков серверов виртуальное «внешнее» хранилище, доступное для всех вычислительных узлов кластера виртуализации. Программные модули VSAN работают на тех же серверах, что и вычислительные узлы, причем на одном и том же сервере располагаются и вычислитель (compute node) и часть системы хранения данных (storage node). Каждый сервер (узел) может иметь от 1 до 5 дисковых групп, причем в каждой группе обязательно минимум один SSD-диск и от 1 до 7 обычных HDD-дисков. Твердотельные SSD-диски в таких дисковых группах составляют общий объем памяти для кэширования данных, из которой VSAN в первую очередь читает данные, а если их нет, то VSAN обращается к HDD-дискам.

Виртуальные машины могут быть настроены с учетом служебного параметра FTT (failures to tolerate), который по умолчанию равен двум и позволяет данные виртуальных машин записывать сразу на два разных узла кластера. При выходе из строя одного из серверов всегда будет синхронная реплика на другом узле, причем все операции ввода – вывода автоматически пойдут на эту вторую копию. При проектировании VSAN

При проектировании VSAN необходимо учитывать: 1. совместимость с аппаратным обеспечением, 2. сеть, которая должна быть как минимум 10 GB, 3. производительность дисковых контроллеров, 4. объем дисков при доступности дисков по 4, 6 ТБ, VSAN лучше строить из дисков объемом 1 ТБ (с точки зрения затрат времени при восстановлении после сбоя), 5. соотношение объема SSD к объему жесткого диска, 6. соотношение вычислительных мощностей к дисковому пространству.

1. По материалам сети Интернет, <https://www.vmware.com>, <https://habr.com/>

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЕ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Дубинин С.В.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск Республика Беларусь.

Емкостные составляющие тока утечки на землю в электрической сети в составе с частотным электроприводом могут достигать значительных величин и представлять опасность для обслуживающего персонала. Основная причина этому – значительное снижение емкостного сопротивления электрической сети относительно земли для высокочастотных составляющих выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ), подключенного к асинхронному электродвигателю (АД) [1].

Схема замещения фрагмента электрической сети на участке от ПЧ до АД приведена на рис.1, где обозначены: E_A, E_B, E_C – фазные ЭДС преобразователя частоты; L_ϕ – индуктивность заграждающего фильтра; R, L – эквивалентные приведенные активные сопротивления и индуктивности обмоток асинхронного электродвигателя; C_1, C_2, C_3 – емкости жил силового кабеля относительно земли; R_1, R_2, R_3 – активные сопротивления утечки фаз относительно земли.

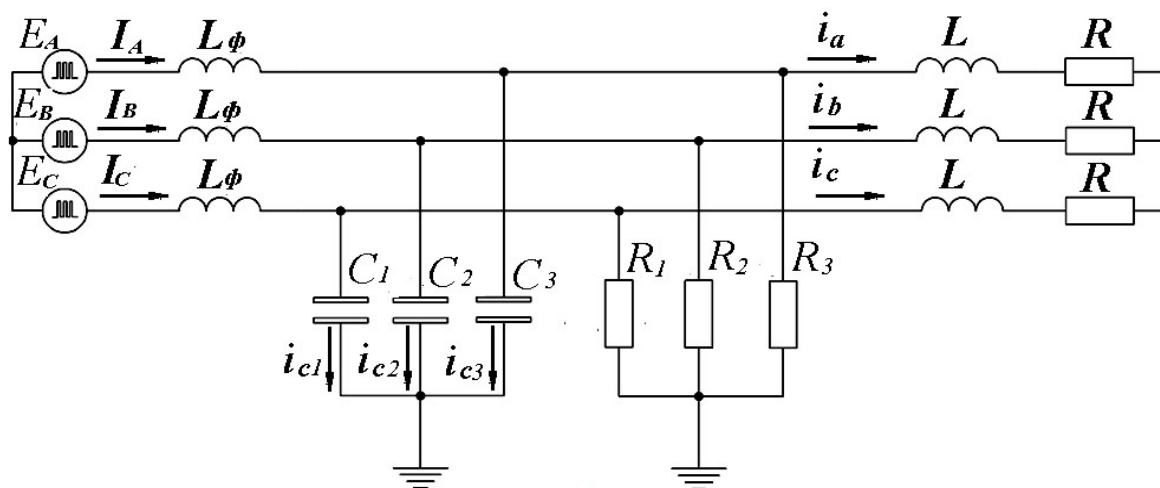


Рисунок 1 – Схема замещения фрагмента электрической сети.

При обосновании допущений в ходе исследования данной схемы предполагается, что преобразователь частоты формирует на выходе трехфазную систему напряжений, в спектральный состав каждого из которых входит синусоидальное напряжение, обеспечивающее рабочий ток АД, а также дополнительные гармонические составляющие вызванные коммутационными процессами в полупроводниковом выходном каскаде преобразователя частоты. Значения токов утечки на землю определялись

как отношения среднеквадратичного значения массива засчитанных напряжений утечки к сопротивлению утечки 1 кОм по формуле:

$$I_{ум} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1000}^n (U_i)^2} / R_{УТ};$$

где $I_{ум}$ – полный ток утечки через сопротивление $R_{УТ} = 1$ кОм,

U_i – массив мгновенных значений напряжения утечки;

n – количество элементов массива. На рис. 2 представлен график зависимости тока утечки на землю от индуктивности L-фильтра при различных значениях емкости кабеля

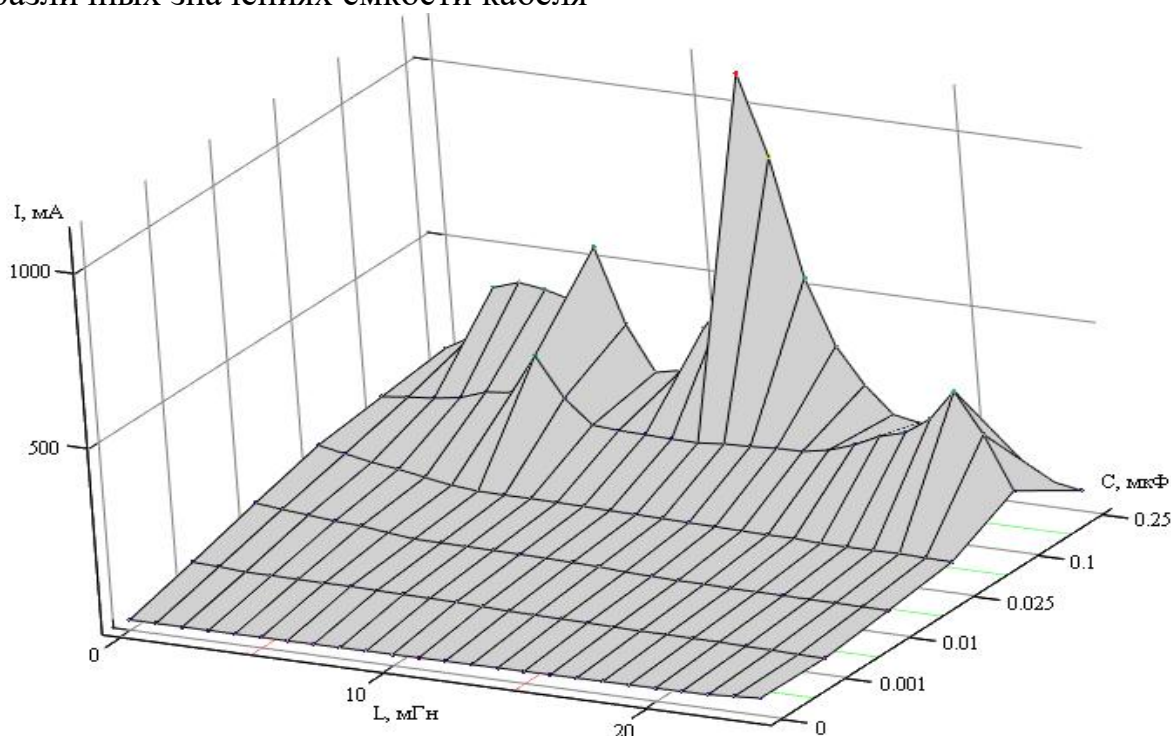


Рисунок 2.10 – Графики зависимости тока утечки на землю от индуктивности L-фильтра при различных значениях емкости кабеля

Приведенный метод оценки влияния параметров L-фильтра позволяет произвести аналитический расчет величины токов утечки на землю и обосновывать выбор типа и модели фильтра, при котором не происходит появления резонансных явлений в электрической сети с преобразователем частоты.

1. Дубинин, С.В. Автокомпенсация емкостных токов утечки на землю в сети с преобразователем частоты конвертированием отрицательного сопротивления: монография / С.В. Дубинин, К.М. Маренич. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – 104с.

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АГРОДРОНА

Заярный В.П., Дубинин С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь.

Выбор критериев оптимизации режимов работы электропривода беспилотного летательного аппарата (БПЛА) во многом зависит от требуемых функций летательного аппарата. [1,2].

В сельском хозяйстве агродроны используются для мониторинга состояния посевов, выявления вредителей, внесения удобрений и др.

Одним из главных критериев эффективности работы агродрона является продолжительность полета БПЛА. Это особенно важно для миссий, требующих длительного наблюдения или мониторинга, таких как экологический контроль или агроразведка. Для достижения этой цели разрабатываются энергосберегающие алгоритмы и используются высокоемкие батареи.

Другой важный аспект - минимизация времени достижения целевой точки. Здесь на первый план выходят мощные электроприводы и оптимизированные траектории полета.

Максимизация дальности полета позволяет БПЛА выполнять задачи на больших расстояниях без необходимости дозаправки. Оптимизация аэродинамических характеристик и улучшение энергоэффективности приводов играют ключевую роль в достижении этой цели.

Для достижения оптимальной эффективности и надежности работы беспилотных летательных аппаратов, необходимо учитывать ключевые факторы и использовать соответствующие соотношения для их расчета. К таким ключевым факторам относятся следующие параметры БПЛА.

1. Мощность электропривода БПЛА.

Мощность определяется по формуле: $P=U \times I \times \eta P$. где: P - мощность (Вт), U - напряжение (в вольтах, В), I - ток (А), η - КПД.

2. Емкость аккумулятора.

Емкость аккумулятора влияет на продолжительность полета и рассчитывается по формуле:

$$C = \left(\frac{Pt}{U} \right)$$

где C - емкость аккумулятора (Ач), P - мощность, потребляемая БПЛА (Вт), t - время полета или работы (ч). U - напряжение аккумулятора (В).

3. Скоростные характеристики

Скорость связана с мощностью и аэродинамическими характеристиками БПЛА:

$$V = \left(\frac{2P}{\rho C_D A} \right)^{\frac{1}{3}}$$

где: nV — скорость (м/с), P — мощность (Вт), ρ — плотность воздуха (кг/м³), C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления, A — площадь проекции БПЛА на фронтальную поверхность (м²)

Исходя из приведенных соотношений можно получить зависимость максимальной дальности полета БПЛА от его скорости (Рис.1).

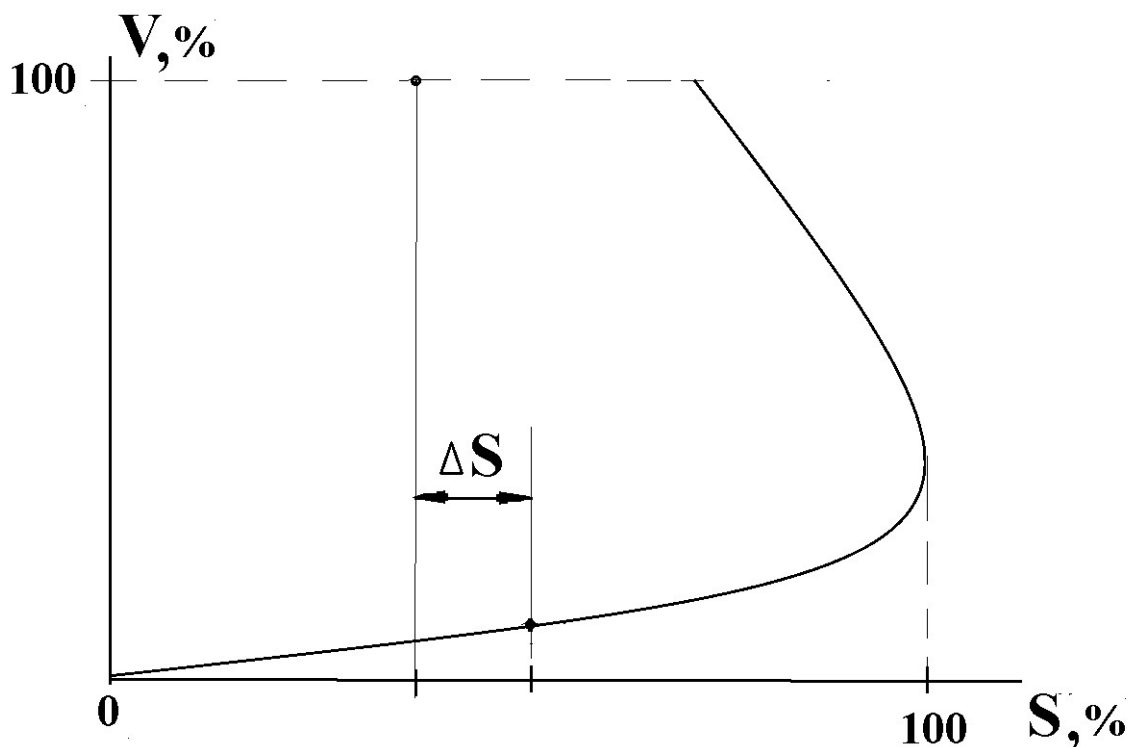


Рисунок 1 - Максимальная дальность полета БПЛА: V – скорость перемещения БПЛА, S – максимальная дальность полета, ΔS – интервал невозврата.

Полученную зависимость можно использовать для выбора оптимальных параметров в процессе проектирования электроприводов беспилотных летательных аппаратов.

1. Mohammad, S. Unmanned Aircraft Design / S. Mohammad A Review of Fundamentals - Synthesis Lectures on Mechanical Engineering - 1(2):i September 2017 -193.
2. Заярный, В. П. Влияние параметров системы электропитания на динамические свойства электропривода агродрона / В. П. Заярный, С. В. Дубинин // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 16-17 октября 2024 г. : в 2 ч. - Минск : БГАТУ, 2024. - Ч. 1. - С. 261-262.

ПРОГРАММНЫЕ СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ПОЛЕТ АГРОДРОНА

Заярный В.П., Дубинин С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь.

Амплитуда вибраций агродрона зависит от сбалансированности винтомоторной группы и качества исполнения рамы. Для защиты полетного контроллера и гироскопа в его составе от вибраций и ударных нагрузок применяется мягкое крепление к раме (Soft mount), которое должно быть в меру жестким, но и не сильно мягким (мягкость может принести ещё больше вреда). Алгоритм защиты агродрона от вибраций выглядит следующим образом (рис.1).



Рис.1 Структурная схема системы защиты агродрона от вибраций

Программные фильтры - это более точные и многогранные способы защиты, чем механические фильтры. Алгоритм защиты в борьбе с вибрациями основан на изменении скорости вращения электродвигателей до предельных значений, что может вызвать при этом ещё большие резонансные колебания и оказывать отрицательное влияние на показания гироскопа.

На частотах 200 и 270 Гц, как правило, имеется наибольшая амплитуда вибрации, поэтому в программе управления обычно применяются два NOTCH фильтра на каждую из частот.

В целом ориентируются на вибрации частотой колебаний от 50 Гц и выше. Затем программной фильтрацией уменьшают их значение до уровня, не оказывающего значительного влияния на работу бортовых камер и гироскопа. Работая в полосе от 100 до 400Гц, два NOTCH фильтра подавляют частоты усиленных вибраций до приемлемого значения, что отображено на рис.2.



Рис.2 Режекция пиков вибраций на частотах 200 и 270 Гц

В случае динамических изменений пиков вибраций фильтры целесообразно подстраивать методом PID – регулирования. Пиковые частоты зачастую изменяются от ударов о предметы в полёте, разбалансировки винтов, деформации рамы. В этом случае более эффективна следующая схема фильтрации (рис.3).

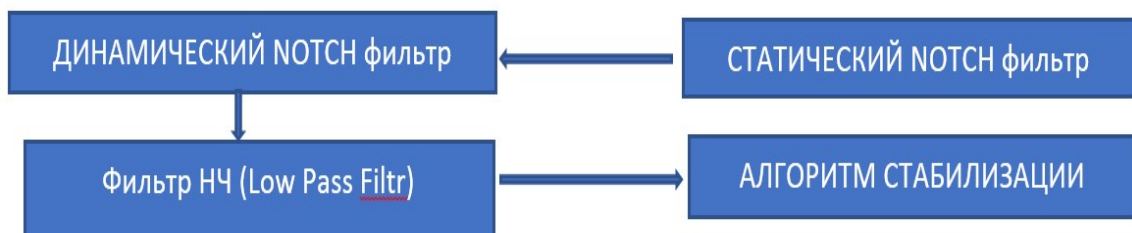


Рис.3 Использование динамических и НЧ фильтров в борьбе с вибрациями.

Таким образом, вышеперечисленными программными способами возможно уменьшение влияния вибраций на качество работы оборудования агродрона, что повышает четкость видеоизображения бортовой камеры и точность работы гироскопа.

1. Попов, Д.И. Анализ рекурсивных режекторных фильтров в переходном режиме/ Д.И. Попов // Известия Тульского технического университета. Технические науки. Тула : 2023 г. – С.19.
2. Заярный, В. П. Влияние параметров системы электропитания на динамические свойства электропривода агродрона / В. П. Заярный, С. В. Дубинин // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 16-17 октября 2024 г.: в 2 ч. - Минск : БГАТУ, 2024. - Ч. 1. - С. 261-262.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Ибрагим А.К.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В последние годы люди постоянно стремятся повысить эффективность производства за счет замены человеческого труда роботами. Поскольку производства становятся все более сложными, то степень автоматизации и интеллектуальная составляющая применяемых роботов становится все выше и выше. Современный интеллект требует, чтобы роботы могли выполнять установленные задачи с минимальным вмешательством человека. Поэтому роботы обычно имеют такие функции, как восприятие окружающей среды, позиционирование и навигация, планирование пути, автономное движение и выполнение задач.

Среди большого количества роботов выделяют как класс мобильные роботы колесного типа. Мобильный робот представляет собой комплексную систему, которая объединяет множество функций, таких как восприятие окружающей среды, динамическое принятие решений, контроль поведения и исполнение. Благодаря постоянному прорыву в технологии исследования роботов и постоянному расширению областей применения ученые сталкиваются с трудностями по управлению движением мобильными роботами. Поэтому исследование технологии управления и навигации мобильного робота имеет обширную прикладную ценность и большое теоретическое значение.

Для получения важной информации о состоянии мобильного робота, такой как его собственное положение, скорость, ориентация и препятствия осуществляется посредством мониторинга состояния окружающей среды, а методом, который данный процесс осуществляет – SLAM (метод одновременной локализации и картирования).

SLAM – это метод, который позволяет мобильным роботам автономно выполнять анализ восприятия окружающей среды и получать состояние себя и окружающей среды в недетерминированной среде.

Структура алгоритма SLAM включает пять шагов:

- (1) сбор и обработка данных датчиков;
- (2) использование алгоритмов сопоставления;
- (3) внутренняя обработка данных (использование алгоритмов фильтрации);
- (4) алгоритм построения карты (карта признаков, карта сетки занятости, карта облака точек и т. д.);
- (5) обнаружение циклов.

Построение карты мобильного робота

Карты являются важной частью робототехники. Для автономного мобильного робота чем точнее модель карты, тем более важную роль она играет на этапе позиционирования, планирования пути и навигации. До сих пор модели карт в основном включают масштабную карту, карту объектов, топологическую карту и семантическую карту.

Масштабные карты являются наиболее распространенной и интуитивно понятной формой карт. Эти карты пропорциональны реальной среде и являются наиболее легко понимаемыми моделями карт для людей. Однако в робототехнике наиболее распространенной формой масштабной карты является сеточная карта. Поскольку создание и ведение сеточных карт очень просты, а соответствующая связь с реальной средой проста и понятна.

Карта объектов не хранит информацию обо всей среде, а хранит некоторые знаковые объекты. В робототехнике существуют различные формы объектов на картах объектов. Это могут быть объекты, извлеченные из данных датчиков, или объекты оператора, полученные из изображений, или искусственные объекты в среде.

Топологическая карта обычно используется для описания связей каждой части карты. В отличие от предыдущих карт, топологические карты используют узлы и связи между узлами для представления среды. В топологической карте узлы используются для представления определенного местоположения в среде, а связи используются для представления информации о пути между узлами.

Семантическая карта не только содержит основную информацию о среде, но и содержит высокоуровневое понимание среды (например, местоположение объекта или его назначение). Семантические карты играют чрезвычайно важную роль в реализации более интеллектуальных роботизированных систем.

1. Ge Xinliang. Environmental identification of mobile robots based on information fusion of various sensors [D]. Hebei University of Technology, 2003.
2. Li J.T. Design Optimization of Amazon Robotics [J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 4(2): 48.
3. Jung E.J., Yi B.J., Kim W. Kinematic Analysis and Motion Planning for a Planar Multiarticulated Omnidirectional Mobile Robot [J]. Mechatronics IEEE/ASME Transactions on, 2015, 20(6): 2983-2995.
4. Fan Yiping, Wang Xiaodi, Wen Liqun. Review and Enlightenment of Intelligent Robot Development Research [J]. Tianjin Science and Technology, 2018, 45(11): 82-84.
5. Wang Anxiong. Research on Environment Modeling and Path Planning of Autonomous Mobile Robots Based on ROS [D]. Xi'an University of Technology, 2020.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ТИТАНА VT1

Иванов А.И., Сенченко Г.М.

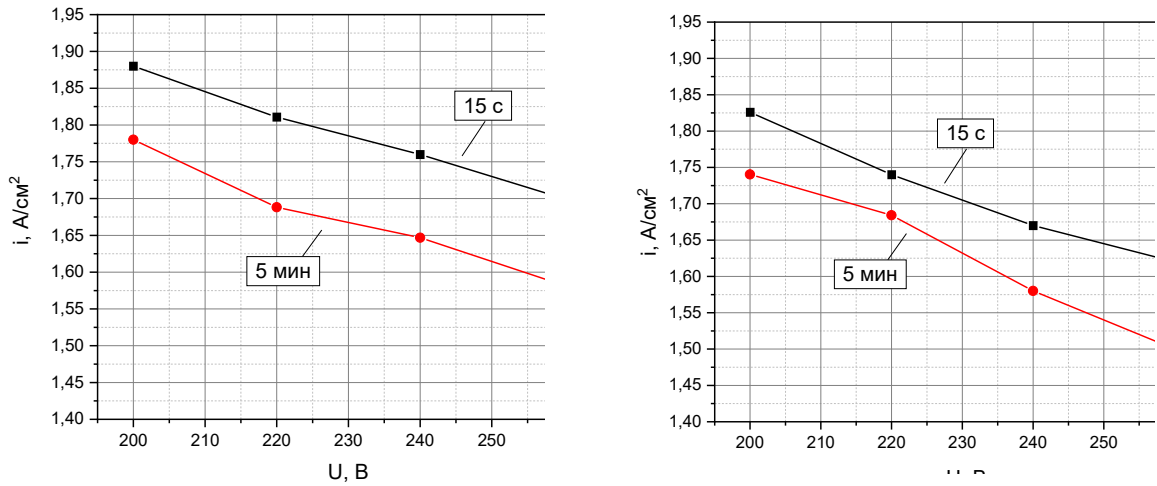
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В работе исследовалось влияние рабочего напряжения на плотность тока и удельную плотность теплового потока при электролитно-плазменной цементации (ЭПЦ). Объектом исследования являлись образцы из технически чистого титана VT1 в форме пластин размером $10 \times 10 \times 1$ мм. В качестве электролита использовался водный раствор, содержащий 10 % хлорида аммония и 10 % глицерина. Образцы подвергались ЭПЦ в течение 5 мин после их полного погружения в электролит, скорость погружения составляла 1–1,5 мм/с. Величину рабочего напряжения в процессе экспериментов изменяли от 200 до 260 В. В ранее проведенных исследованиях было показано, что электролитно-плазменный нагрев в данном диапазоне напряжений позволяет нагревать образцы до температур 750–1150 °С [1]. Температура электролита в процессе экспериментов устанавливалась на уровне 20 и 30 °С и поддерживалась на нем в течение всего процесса обработки при помощи системы охлаждения установки, состоящей из chillера, теплообменника и барботера. Контроль величины рабочего напряжения осуществлялся при помощи цифрового осциллографа OWON XDS3102A. Фиксация величины тока обработки осуществлялась при помощи этого же осциллографа и токоизмерительного шунта. Измерения производились через 15 с и через 5 мин после полного погружения образца в электролит.

По результатам проведенных измерений были построены графики изменения плотности тока, а также удельной плотности теплового потока от величины рабочего напряжения при различном значении температуры электролита (рис. 1 и 2).

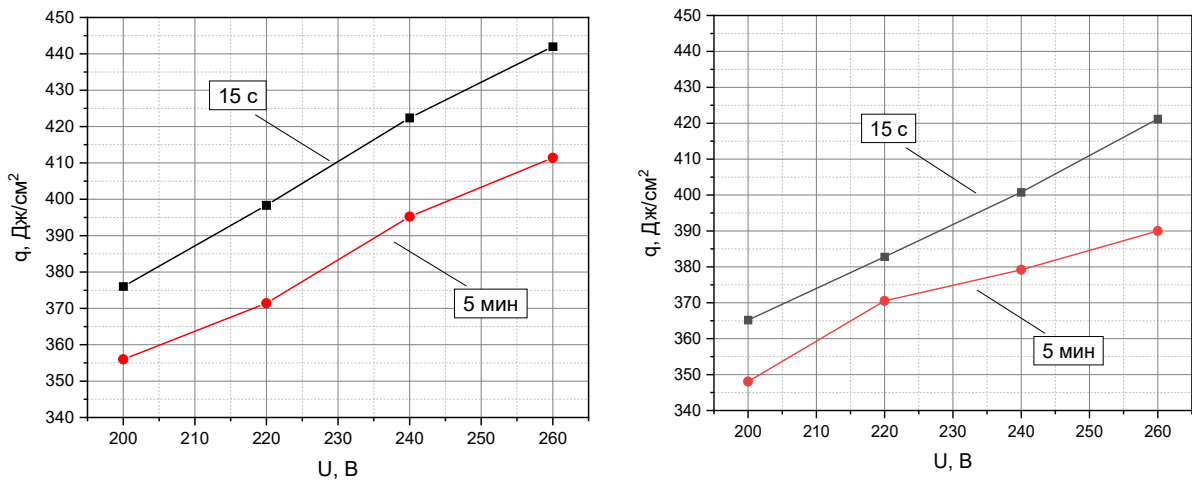
Как видно из представленных графиков, максимальная плотность тока при ЭПЦ ($1,77 \text{ А/см}^2$) фиксируется при температуре электролита 20 °С и напряжении 200 В. По мере роста напряжения данный параметр снижается и достигает минимума при 260 В. В относительном выражении снижение плотности тока составляет 11 % при температуре электролита 20 °С и 14 % – при температуре 30 °С, что свидетельствует о значительном влиянии температуры электролита на протекание ЭПЦ. Кроме того, следует отметить, что в начале процесса плотность тока выше, чем в конце, а ее падение при температуре электролита 20 и 30 °С составляет 5–7 %. В то же время удельная плотность теплового потока, напротив, с ростом напряжения увеличивается, причем разница между ее значениями при 200 В и 260 В достигает 17 %. Максимальная удельная плотность

теплового потока наблюдается при температуре электролита 20 °С, при этом разница с результатами, полученными при температуре 30 °С, составляет 5 %. Аналогично плотности тока, удельная плотность теплового потока в начале процесса ЭПЦ выше, чем в конце.



а – температура электролита 20 °С; б – температура электролита 30 °С

Рис. 1. Изменение плотности тока при ЭПЦ образцов через 15 с и 5 мин от начала обработки в зависимости рабочего напряжения



а – температура электролита 20 °С; б – температура электролита 30 °С

Рис. 2. Изменение удельной плотности теплового потока при ЭПЦ образцов через 15 с и 5 мин от начала обработки в зависимости рабочего напряжения

1. Иванов, А. И. Распределение температурных зон при электролитно-плазменном нагреве титановых сплавов / В. М. Асташинский, А. Ю. Королёв, А. И. Иванов [и др.] // Наука и техника. – 2024. – № 6. – С. 443-450.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Иванов И.А., Ковалевич Э.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Среди различных методов формирования на поверхностях деталей машин и инструмента сложнолегированных функциональных покрытий широкое применение нашли методы осаждения потоков низкотемпературной плазмы в вакууме [1]. Высокая степень ионизации и энергии конденсируемых частиц определяет простоту управления потоком, высокую силу сцепления осаждаемых покрытий с основой и формирование плотных конденсатов. Использование вакуума гарантирует чистоту процесса, а использование в качестве рабочей среды реакционноспособных газов позволяет формировать покрытия на основе тугоплавких соединений (таких как нитриды, силициды, карбиды тугоплавких металлов) при относительно низких температурах основы (100...300 °С) [2]. Установки нанесения покрытий данными методами могут быть легко автоматизированы, однако правильность выбора технологических режимов осаждения и качество получаемых покрытий все еще зависит от квалификации оператора.

Задача данного исследования - разработать подходы к построению численных моделей многофакторных технологических процессов на этапе постановки задачи. На основе этих моделей в последующем будет разработано программное средство управления процессом осаждения покрытий.

Процесс формирования покрытий вакуумно-плазменными способом представляет собой последовательность трех последовательных взаимосвязанных технологических этапов: генерация ионно-плазменного потока (рабочего вещества); перенос рабочего вещества от генератора к поверхности конденсации и взаимодействие рабочего вещества и рабочей среды (атомов остаточного или легирующего газов); взаимодействие рабочего вещества с поверхностью детали, формирование покрытия. В зависимости от энергии ионов потока взаимодействие плазменного потока с поверхностью детали может идти в режимах распыления или конденсации. Проектирование технологического перехода есть одновременное построение последовательности этих трех технологических этапов, каждый из которых имеет свои параметры, однозначно описывающие его. Структурно-функциональный анализ процесса нанесения вакуумно-плазменных покрытий показал, что помимо трех основных технологических этапов данный технологический процесс включает три подготовительные операции: обеспечение

требуемого качества поверхности детали, на которую наносится покрытие (так называемая, вне вакуумная подготовка); выбор состава материала катода и способа его изготовления; установка детали в технологической оснастке в рабочем объеме вакуумной камеры [3].

В целом проблема моделирования может быть представлена как проблема оптимизации целевой функции с детерминированными параметрами, либо со случайными параметрами, значения которых можно получить с любой степенью достоверности. Решение имеет матрицу вероятных решений: $X = (X_{ij})$, $i = 1 \dots n$, $j = 1 \dots m$, где m – число возможных решений; n – число параметров, определяющих решение. В общем случае эти параметры могут быть функциями.

Компоненты этой матрицы связаны множеством ограничений Y , вызванных физическими процессами и принятой схемой реализации технологических этапов. Правильность выбора решения оценивается набором критериев e_1, e_2, \dots, e_q , каждый из которых имеет фактор относительной важности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$ (вектор важности A). Выбранное оптимальное решение из матрицы X должно соответствовать принципу оптимальности вектора критериев E ввиду вектора важности A и при выполнении ограничений Y : $E = \text{optimum}\{E(A, X), A\}$.

Компьютерное моделирование таких многофакторных процессов направлено на построение “сквозной” модели всех стадий процесса нанесения покрытий в виде аналитического описания имеющихся экспериментальных результатов [4]. Упрощение компьютерной реализации математических моделей при сохранении точности вычисления может быть достигнуто за счёт модульного построения программного комплекса и привлечением технологии объектно-ориентированного программирования с учетом независимости внутреннего логического построения модулей [5].

1. Sultan, S.A, Ivanou, I.A. Alternative technologies of metal deposition and its mathematical simulation// Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 2004: в 4 т. - Донецк: Донецкий НТУ, 2004.- Т.4. - С. 241-244.
2. Плазменно-вакуумные покрытия /Под общ. ред. Ж.А. Мрочка. - Минск: УПТехнопринт, 2004. - 369 с.
3. Султан, С.А.И., Иванов, И.А. Технологические стадии PVD процессов и их компьютерное моделирование// Новые материалы оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф.- Могилев: ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», 2005.-С. 129.
4. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас [и др.] - Минск: Бестпринт, 1998. - 212 с.
5. Султан, С.А.И., Иванов, И.А., Иващенко, С.А., Голушко, В.М. Разработка программного модуля для расчёта скорости осаждения титано-вой плазмы в среде технологического газа// Вестник БНТУ.- 2006. - №5. - С.21-24.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СКОРОСТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

**Качанов И.В., Ленкевич С.А., Быков К.Ю,
Шаталов И.М., Кундир М.А.**

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Дентальный имплантат представляет собой стержень с резьбой из титановых сплавов для вкручивания в челюсть и полостью для фиксации абатмента на который устанавливается зубная коронка (рисунок 1).

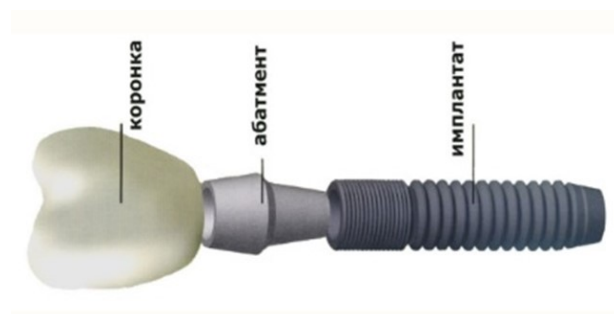


Рисунок 1 – Внешний вид дентального имплантата

В состоянии поставки титановые $\alpha + \beta$ сплавы, как правило обладают низкой технологической пластичностью и неоднородностью структуры. В связи с этим актуальной задачей является применение способов получения изделий сложной формы и качественного структурного состава, подробно о данной проблеме описано в работе [1].

В работе [2] показано, что формирование субмикроструктурного и нано-структурного состояний в сплавах титана приводит к значительному улучшению комплекса механических свойств, в т.ч. необходимых для их использования в качестве материала для медицинских имплантатов.

Однако анализ результатов научно-исследовательских работ, по получению ультрамелкозернистых структур способами интенсивной пластической деформации в металлических материалах показал, что имеются серьезные технологические трудности, которые обусловлены высокой стоимостью обработки, низкой производительностью процесса.

В этой связи более рационально достигать интенсивность деформации путем приложения импульсных нагрузок за счет высоких скоростей деформирования при оптимальном подборе режимов (траекторий и температурно-скоростных интервалов) деформации. Наиболее перспективным способом для формообразования дентальных имплантатов в этой связи представляется комбинированное скоростное выдавливание,

которое позволит получать практически готовое изделие за один технологический переход.

Для оптимизации технологических параметров при снижении трудоемкости обработки лабораторной технологии комбинированного скоростного выдавливания предварительные исследования проводились путем вычислительных экспериментов в программном комплексе DEFORM-3D с возможностью формообразования заготовки дентального имплантата с выдавливанием полости под установку абатмента и резьбы с установленными картинками напряженного состояния и скорости истечения металла при формообразовании заготовки дентального имплантата.

На рисунке 2 представлена модель скоростного выдавливания заготовки дентального имплантата при начальной скорости деформирования $V_0=80$ м/с и начальной температуре деформирования $T_0=800^\circ\text{C}$.

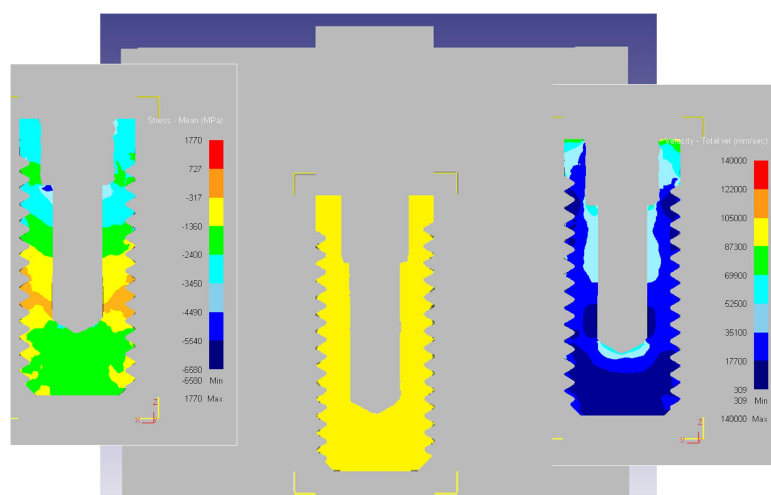


Рисунок 2 – Модель формообразования дентального имплантата

В результате компьютерного моделирования установлена технологическая возможность выдавливания заготовки дентального имплантата с формообразованием резьбового профиля при начальной скорости деформирования $V_0=80$ м/с и начальной температуры деформирования $T_0=800^\circ\text{C}$.

1. Быля, О. И. Моделирование эволюции крупнозернистой микроструктуры $\alpha + \beta$ титановых сплавов в процессах горячей штамповки с использованием метода конечных элементов / О.И. Быля, П. Л. Блекелл, Р. А. Васин, М. К. Саран-джи // КШП. – 2016. – №11. – С.15 – 20.
2. Колобов, Ю.Р. Технологии формирования структуры и свойств титановых сплавов для медицинских имплантатов с биоактивными покрытиями. Российские нанотехнологии. Обзоры. 2009. Том 4. № 11-12. С. 69–81.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИ СКОРОСТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Качанов И.В., Ленкевич С.А., Власов В.В.,
Шаталов И.М., Махнач Н.А.**

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Наиболее массовыми изделиями в медицинской практике являются изделия в виде различных винтов (кортикальные, спонгиозные, компрессионные, канюлированные и др.), используемые при остеосинтезе. Для получения таких изделий, как правило, используются цилиндрические или стержневые заготовки переменного сечения.

В качестве материалов для их изготовления широко применяются аустенитные коррозионностойкие стали, в частности сталь AISI 304.

Функциональные свойства данных медицинских изделий в значительной степени определяются микроструктурой материала, из которого они изготовлены. Качественное повышение физико-механических свойств металлов может быть достигнуто за счет измельчения зерен и сопутствующих процессов формирования структуры интенсивной пластической деформацией (высокая плотность дислокаций, нанодвойники, частицы вторых фаз и др.) [1].

Отдельный интерес представляют способы высокоскоростного деформирования металлов, которые имеют определенные преимущества перед штамповкой на обычных прессах и молотах [2].

Структура металлов и сплавов при ударном нагружении формируется при одномоментном воздействии таких факторов как высокое давление, высокие скорости протекания процесса деформации, растягивающие напряжения при разгрузке и тепловой эффект. Наличие данных факторов создает условия для получения объемных материалов с субмикро- и нанокристаллической структурами [2].

В этой связи исследовали скоростное выдавливание, позволяющее за один удар получать высокоточные, стержневые изделия широкого промышленного назначения, включая заготовки медицинского назначения [2].

Однако экспериментальные исследования высокоскоростных процессов при проведении натуральных экспериментов сопряжено с высокими материальными и трудовыми затратами на экспериментальную оснастку, которая зачастую может подвергаться разрушению.

Альтернативой натурным экспериментам может служить компьютерное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D данных технологических процессов в широком диапазоне изменяемых

технологических параметров, что значительно снижает вероятность разрушения оснастки при отработке лабораторных технологий.

В связи с этим, исследовались модели скоростного комбинированного выдавливания с одновременным формообразованием полости под ключ в заготовке.

Исследования для стали AISI 304 проводились для выдавливания с коэффициентом вытяжки $\lambda=1,56$ и $\lambda=4$ и начальных температурах деформирования $T_0=800, 1000$ и 1100°C .

На рисунке 1 представлены модели для комплексного исследования при различных условиях деформирования с формообразованием полости под ключ.

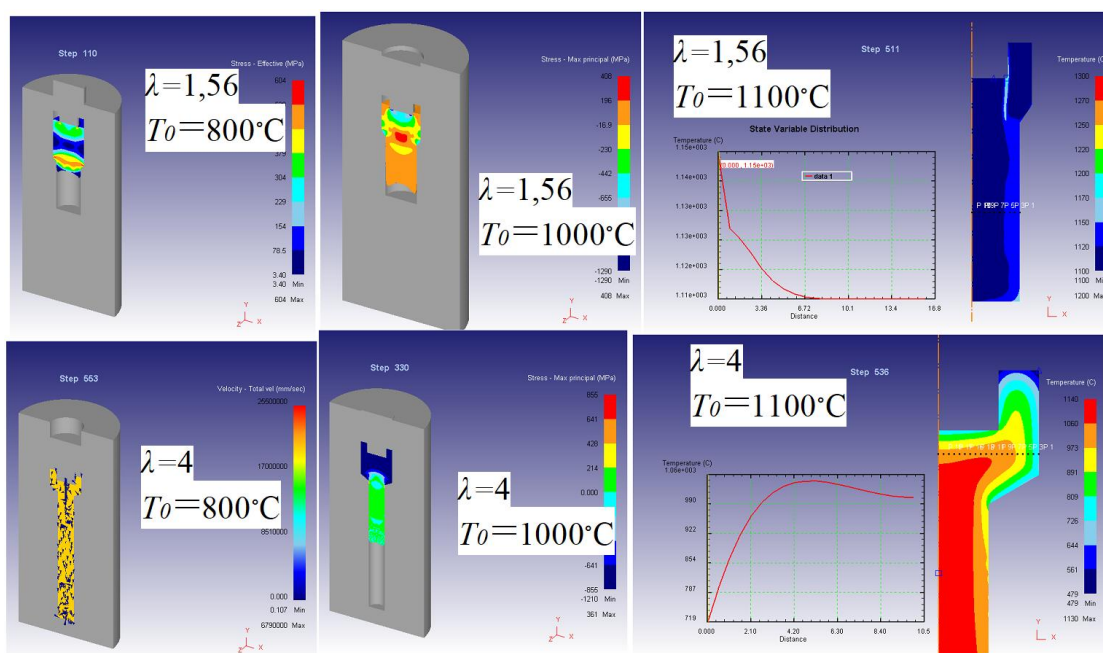


Рисунок 1 – Модели для комплексного исследования скоростного выдавливания с полостью под ключ для стали AISI 304

В результате компьютерного моделирования установлена технологическая возможность формообразования стержневых заготовок, в том числе с полостью под ключ из стали AISI 304 скоростным выдавливанием в диапазоне начальных скоростей деформирования $V_0=30-120$ м/с и начальных температур деформирования $T_0=800-1100^\circ\text{C}$.

1. Рыбальченко, О.В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические и служебные свойства стали 08X18H10T: дисс... канд. техн. наук: 05.16.01 / О.В. Рыбальченко. – М., 2014. – 167 с.

2. Качанов, И.В. Исследование процесса и разработка технологии скоростного горячего выдавливания стержневых изделий: дисс... канд. техн. наук: 05.16.05 / И.В. Качанов. – Минск, 1982. – 249 с.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ С РЕГУЛЯРНОЙ СЕТЧАТОЙ СТРУКТУРОЙ

Королёв А.Ю., Нисс В.С.

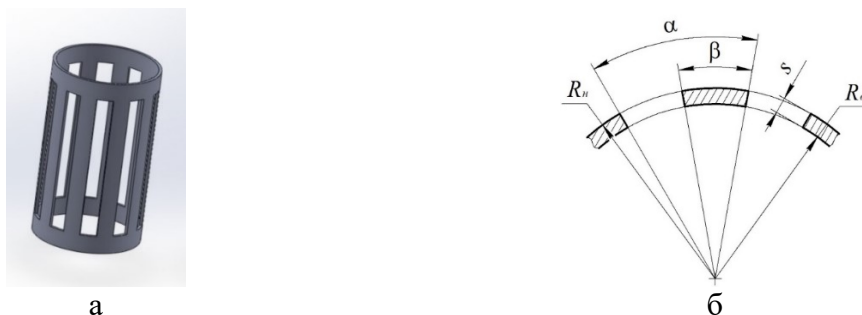
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

С целью повышения качества поверхностей изделий медицинского назначения из металлических материалов широко используется метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО). В результате ЭПО, кроме сглаживания микронеровностей, происходит удаление дефектного слоя с высокой плотностью дислокаций, содержащего также инородные включения, продукты износа инструмента. Ряд изделий медицинского назначения, применяемых в кардиологии, сосудистой хирургии и травматологии, имеют форму трубы с перфорированными в определенном порядке стенками – регулярную сетчатую структуру (рис. 1). ЭПО наружных поверхностей таких изделий не имеет технологических сложностей и достигается с применением традиционной схемы со свободным погружением в электролит. Возможность обработки внутренних поверхностей при такой схеме определяется геометрическими особенностями изделия, которые в свою очередь влияют на распределение линий напряженности электрического поля между обрабатываемыми наружными и внутренними поверхностями и катодом.



Рис. 1. Медицинские изделия с регулярной сетчатой структурой

В качестве примера каркаса с регулярной сетчатой структурой, подобного медицинским изделиям аналогичной формы, в работе исследовались образцы в виде отрезков труб, в которых перфорация стенок выполнена в виде продольных вырезов (рис. 2а). Форма сечения таких образцов задается наружным радиусом R_n , внутренним радиусом R_v , толщиной стенки s , угловым шагом сетки α и угловым размером β , определяющим длину дуг ламели (рис. 2б). Для характеристики степени заполненности стенок образца введен коэффициент заполнения площади k_s , который равен отношению площади ламелей к общей площади цилиндрической поверхности, образующей каркас с регулярной сетчатой структурой. В рассматриваемом случае коэффициент заполнения площади равен отношению углового размера β к угловому шагу α .



а – общий вид каркаса; б – геометрические параметры

Рис. 2. Геометрические параметры исследуемых образцов трубчатой формы с регулярной сетчатой структурой

Двумерная картина распределения силовых линий в поперечном сечении при обработке таких образцов при условии использования коаксиально расположенного к нему катода цилиндрической формы представлена на рис. 3. Наиболее интенсивное электрическое поле формируется на наружной поверхности ламели. На боковых гранях ламели по мере удаления от наружной поверхности плотность силовых линий постепенно снижается. На внутренней поверхности при удалении от граней происходит дальнейшее снижение плотности. Плотность силовых линий на внутренней поверхности и, соответственно, возможность ее анодной обработки, определяются размером вырезов между ламелями каркаса (или коэффициентом заполнения k_s), а также толщиной его стенки. При увеличении коэффициента k_s расстояние между ламелями уменьшается, что приводит к эффекту электростатического экранирования внутренней поверхности от поверхности катода. В результате плотность силовых линий между внутренней поверхностью и катодом снижается. При уменьшении расстояния между ламелями до предельного значения напряженность снижается до такой величины, при которой анодные процессы прекращаются. Аналогичным образом на возможность обработки внутренней поверхности влияет толщина стенки. При относительно тонкой стенке линии напряженности распределяются как на боковых гранях ламели, так и на внутренней поверхности, хотя с меньшей плотностью. С увеличением толщины стенки происходит смещение силовых линий с внутренней поверхности на боковые грани, в результате чего плотность тока снижается, и анодная обработка внутренней поверхности прекращается.

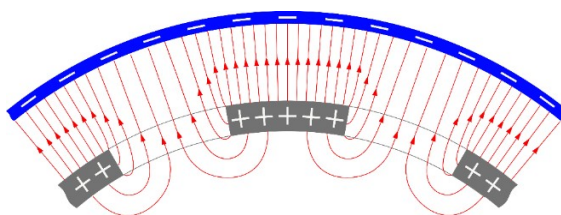


Рис. 3. Двумерная картина распределения силовых линий при обработке образца в виде трубы с перфорацией в виде продольных вырезов

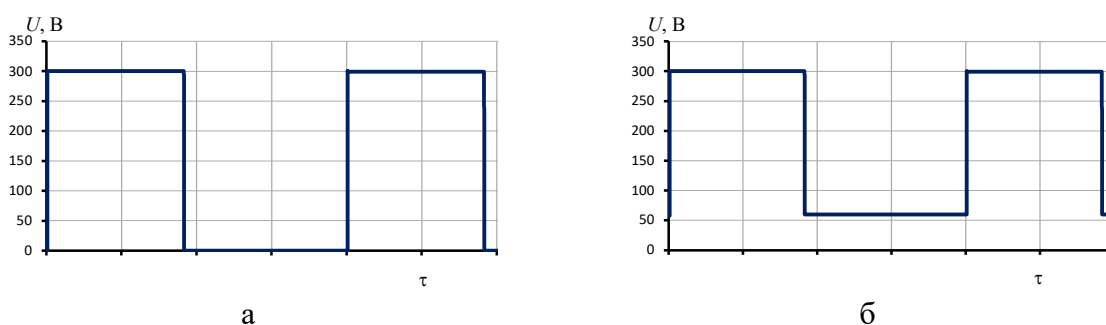
ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

Королёв А.Ю., Нисс В.С., Рожков В.А.

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Основным недостатком стационарных процессов (на постоянном токе) электролитно-плазменной обработки (ЭПО), применяемых для повышения качества поверхности, является высокое энергопотребление. Для повышения эффективности ЭПО разработаны новые режимы, основанные на использовании полностью управляемых по амплитуде и длительности униполярных импульсов (ИЭПО). Повышение эффективности процесса ИЭПО по сравнению с обработкой на постоянном токе становится возможным за счет основного интенсивного съема металла при протекании электрохимического режима и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного режима, при котором обеспечивается высокое качество поверхности.

Примеры разработанных нами схем импульсов напряжения при реализации нестационарных процессов в управляемых режимах ИЭПО представлены на рис. 1. Процессы основываются на чередовании импульсов высокого напряжения (в электролитно-плазменной области) и пауз между ними (рис. 1а) или чередовании импульсов высокого напряжения и импульсов с напряжением, соответствующим электрохимической области (рис. 1б). В первом случае электрохимический режим действует при включении импульса высокого напряжения (в стадии формирования парогазовой оболочки). Во втором, кроме стадии формирования парогазовой оболочки, дополнительное электрохимическое воздействие осуществляется непосредственно во время импульса с напряжением, соответствующим электрохимической области.



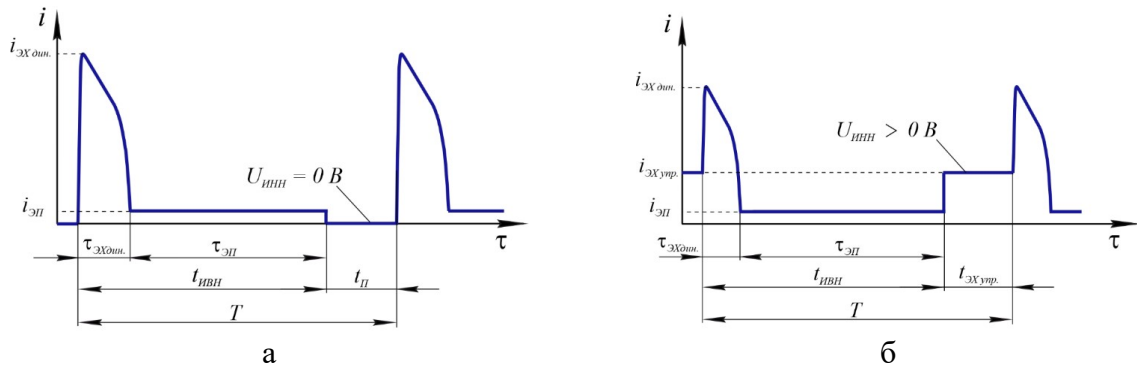
а – импульсы высокого напряжения 300 В с паузами;

б – импульсы высокого напряжения 300 В с импульсами низкого напряжения 60 В

Рис. 1. Примеры схем импульсов напряжения при реализации нестационарных процессов в управляемых режимах ИЭПО

На рис. 2 представлены диаграммы изменения силы тока в пределах периода T при подаче импульсов напряжения в соответствии со схемами

на рис. 1а и 1б. В первом случае (рис. 2а) управляемые импульсы высокого напряжения (ИВН) с длительностью $t_{ИВН}$ и амплитудой, соответствующей электролитно-плазменному режиму $U_{ИВН}$, чередуются с управляемыми по длительности бестоковыми паузами $t_{П}$. При этом период включает неуправляемый динамический электрохимический режим $\tau_{ЭХдин.}$ и электролитно-плазменный режим с длительностью $\tau_{ЭП}$. Неуправляемый динамический электрохимический режим протекает при включении ИВН после бестоковой паузы и соответствует стадии формирования парогазовой оболочки. При включении ИВН возникает интенсивный рост плотности тока до амплитудного значения $i_{ЭХдин.}$ с последующим ее снижением по мере образования парогазовой оболочки до значения $i_{ЭП}$, соответствующего электролитно-плазменному режиму. После отключения ИВН действует бестоковая пауза, в зависимости от длительности которой, происходит полная или частичная конденсация парогазовой оболочки.



а – при паузе между импульсами; б – при дополнительном импульсе низкого напряжения

Рис. 2. Диаграммы изменения силы тока в пределах периода

Наличие между ИВН дополнительных импульсов, соответствующих электрохимической области (управляемый электрохимический режим) длительностью $\tau_{ЭХупр.}$ и плотностью тока $i_{ЭХупр.}$, позволяет увеличить электрохимическую составляющую в пределах периода (рис. 2б). С одной стороны это обеспечивает повышенную производительность (съем металла), а с другой – при превышении предельной доли может привести к формированию поверхности с низким качеством. Наличие импульсов управляемого электрохимического режима обеспечивает снижение энергетических характеристик стадии формирования парогазовой оболочки, то есть следующего за ними динамического электрохимического режима. В результате при такой схеме импульсов формируется меньшая плотность тока динамического электрохимического режима, чем при схеме с бестоковой паузой между ИВН. Таким образом, имеет место комплексное влияние временных и амплитудных параметров управляемых импульсов, что указывает на необходимость дальнейшего уточнения их взаимосвязей, а также их влияния на съем металла и качество формируемой поверхности на основе результатов экспериментальных исследований с целью практической реализации разработанных режимов.

УДК 681.51(075.8)

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ШТАТНОЙ И ПРЕДЛАГАЕМОЙ ДВУКРАТНО ИНВАРИАНТНОЙ САР РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА Е-75-3,9-440 ГМ БРЕСТСКОЙ ТЭЦ

Кулаков Г.Т., Кравченко В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для формирования нормального топочного режима необходимо поддерживать небольшое (до 20-30 Па) постоянное разрежение в верхней части топки парового котла. Это способствует устойчивости факела и служит показателем материального баланса между уходящими газами и подаваемым в топку воздухом. Участком объекта регулирования в этом случае является топочная камера с газоходами от поворотной камеры до всасывающих патрубков дымососов.

К внутренним возмущающим воздействиям относят нарушения газоздушного режима, к внешним – изменение расхода воздуха в зависимости от тепловой нагрузки агрегата. Регулирующим воздействием является изменение количества уходящих газов, отсасываемых дымососами. При этом их подачу можно регулировать за счет изменения частоты регулируемых электроприводов (ЧРЭП).

Максимальное распространение получила САР разрежения с одноимпульсными ПИ-регуляторами [1].

С точки зрения электрозатрат на привод наиболее экономичным является скоростное регулирование за счет изменения частоты вращения ЧРЭП по сравнению с дросселированным регулированием. Для достижения максимальной экономичности в этом случае предлагается модернизировать одноконтурную штатную САР разрежения в многоконтурную двукратно инвариантную систему относительно к наиболее опасному внутреннему возмущению и крайнему внешнему воздействию.

Ставим задачу убрать перерегулирование и снизить колебательность переходного процесса при отработке скачка задания, добиться полной инвариантности при отработке скачка наиболее опасного дополнительно измеряемого внутреннего возмущения, а также уменьшить не менее, чем в 2 раза модуль площади ошибки регулирования при отработке крайнего внешнего возмущения расходом пара.

Усредненные экспериментальные кривые разгона динамических характеристик по разряжению в топке при возмущениях частотой ЧРЭП были аппроксимированы по методам БНТУ [2, 3] инерционным звеном второго порядка для максимальной нагрузки котла:

$$W_{об1}(p) = \frac{K_{об1}}{(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)} = \frac{42,1}{(5,3 p + 1)(2,7 p + 1)}. \quad (1)$$

Структурная схема штатной и предлагаемой двукратно инвариантной САР приведена на рисунке 1.

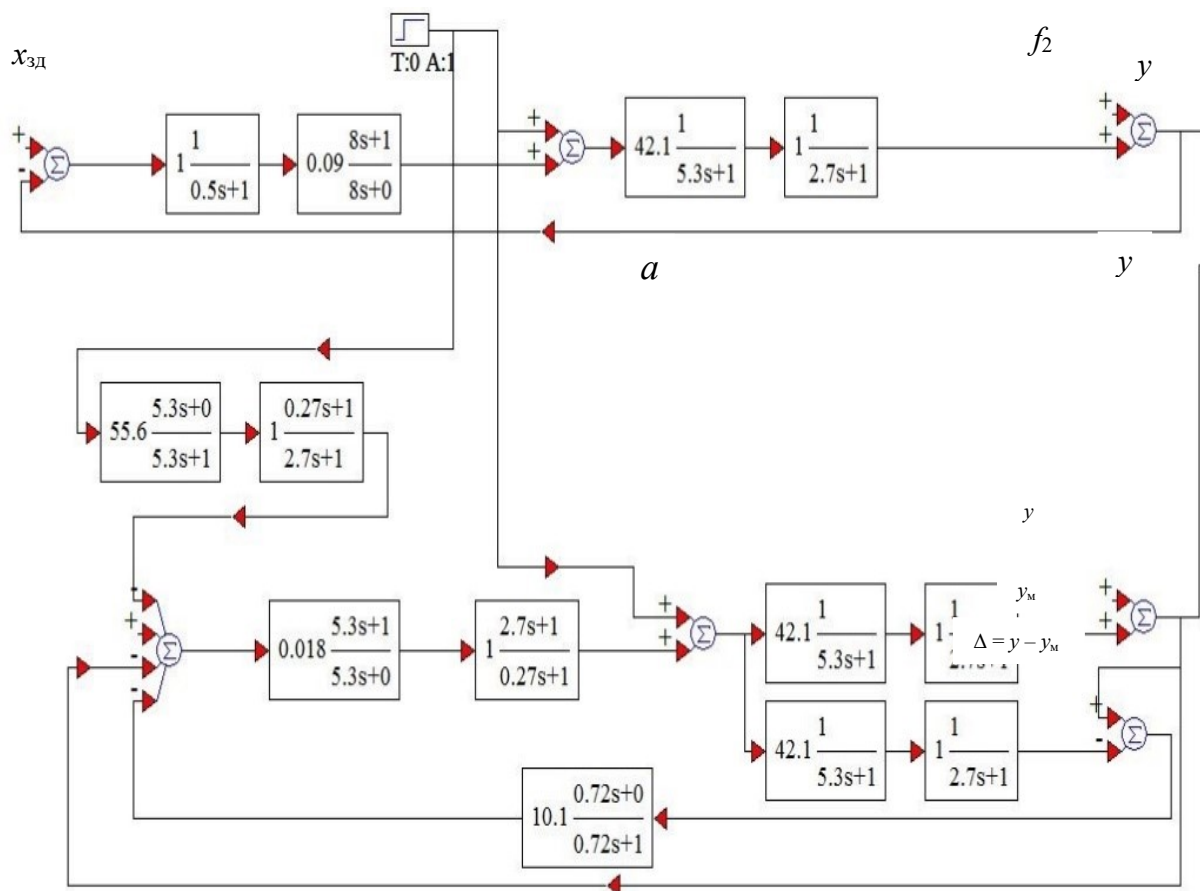


Рисунок 1 – Структурные схемы штатной (а) и предлагаемой двукратно инвариантной САР разрежения в топке котла Е-75-3,9-440 ГМ (б)

Если использовать передаточную функцию объекта в виде инерционного звена второго порядка (1), то нужно для повышения качества регулирования применить реальный ПИД-регулятор:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{k_p (T_i p + 1)(T_d p + 1)}{T_i p (T_6 p + 1)},$$

где k_p – коэффициент передачи, T_i – время интегрирования, T_d – время дифференцирования, T_6 – балластная постоянная времени [4].

В этом случае для расчёта параметров его динамической настройки следует применять метод полной компенсации в частном виде:

$$T_i = T_1; T_d = \sigma; T_6 = T_d/10 [2].$$

При этом, если для отработки скачка задания допускается перерегулирование 4,3 % от скачка задания, то коэффициент передачи регулятора рассчитывают по формуле:

$$K_p = \frac{T_1}{4\zeta^2 K_{об1} \sigma} = \frac{T_1}{2K_{об1} \sigma},$$

что соответствует коэффициенту демпфирования $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Если перерегулирование не допускается, то применяют коэффициент демпфирования $\zeta = 1$.

Для существенного повышения качества регулирования при обработке крайнего возмущения нагрузкой котла параллельно передаточной функции объекта по каналу регулирующего воздействия формируем его полную модель, на вход которой с целью выделения внешнего эквивалентного возмущения подаём выход реального регулятора, а выход модели y_m подаём на вход дополнительного элемента сравнения (ЭС) с помощью отрицательной связи. На второй вход ЭС с плюсом подаём сигнал с выхода датчика основной регулируемой величины $y(t)$, а полученную разницу $\Delta = y - y_m$ подаём на вход реального дифференциатора инвариантности эквивалентного внешнего возмущения. Выход дифференциатора инвариантности подаём с минусом на вход реального ПИ-регулятора. При этом дифференциатор выполняет функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения и имеет передаточную функцию:

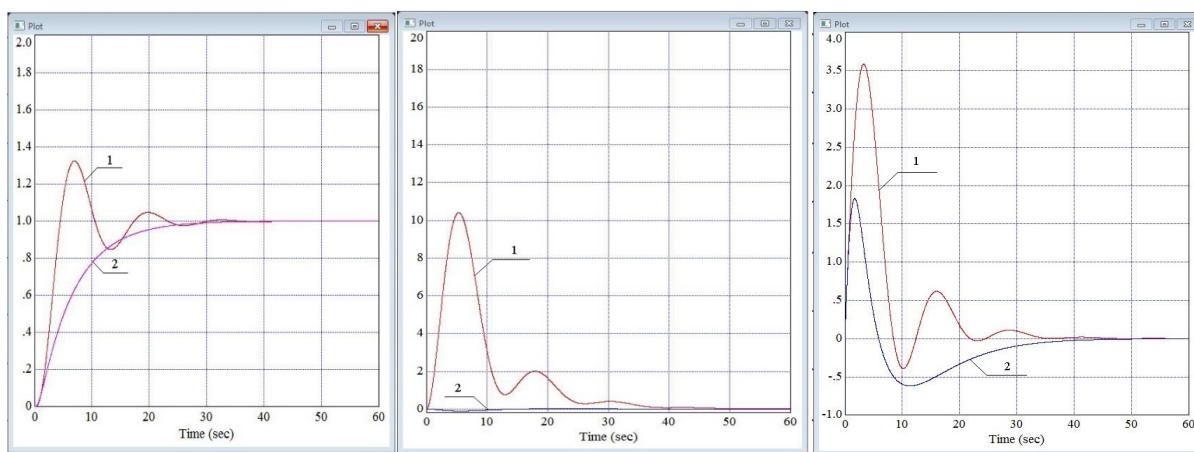
$$W_d(p) = \frac{K_d T_d p}{T_d p + 1},$$

где K_d – коэффициент передачи дифференциатора, T_d – время дифференцирования, численные значения которых рассчитывают по следующим формулам:

$$T_d = 0,09(T_1 + \sigma_1);$$

$$K_d = \frac{T_1 + \sigma_1}{T_d} - 1 \quad [2].$$

В результате чего достигается существенное повышение качества обработки крайнего внешнего возмущения.



а **б** **с**
 Рисунок 2 – Графики переходных процессов штатной (кривые 1) и предлагаемой двукратно инвариантной САР (кривые 2) при отработке скачка задания (а), внутреннего (б) и внешнего (с) возмущений

Графики переходных процессов штатной и предлагаемой двукратно инвариантной САР (ИСАР) приведены на рисунке 2, из анализа которых следует, что при отработке скачка задания ИСАР исчезает перерегулирование величиной 30 % от скачка задания (рисунок 2, а). При отработке скачка наиболее опасного внутреннего возмущения достигается полная инвариантность (рисунок 2, б). При отработке крайнего внешнего возмущения модуль площади ошибки регулирования ИСАР и максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшается в 2,3 раза по сравнению со штатной САР.

Таким образом поставленная цель повышения качества регулирования достигнута и предлагаемую двукратно инвариантную САР разрежения в топке котла целесообразно рекомендовать для широкого внедрения на ТЭС ГПО «Белэнерго».

1. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов / Г.П. Плетнев. – 4-е изд. стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
2. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие / Г.Т. Кулаков. – Мн.: Вышэйшая школа, 1984. – 192 с.
3. Кулаков, Г.Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования тепловых электростанций в переменных режимах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.13.07 и 05.14.14. Киев: КПИ, 1988. – 26 с.
4. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 197 с.

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОТЛА Е-75-3,9-440 ГМ

Кулаков Г.Т., Кравченко В.В., Воюш Н.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Структурная схема моделирования переходных процессов штатного регулятора тепловой производительности котла (РТПК) приведена на рисунке 1, *a* при штатных параметрах динамической настройки для максимальной нагрузки котла, а предлагаемой инвариантной системы автоматического регулирования (ИСАР) – на рисунке 1, *b*.

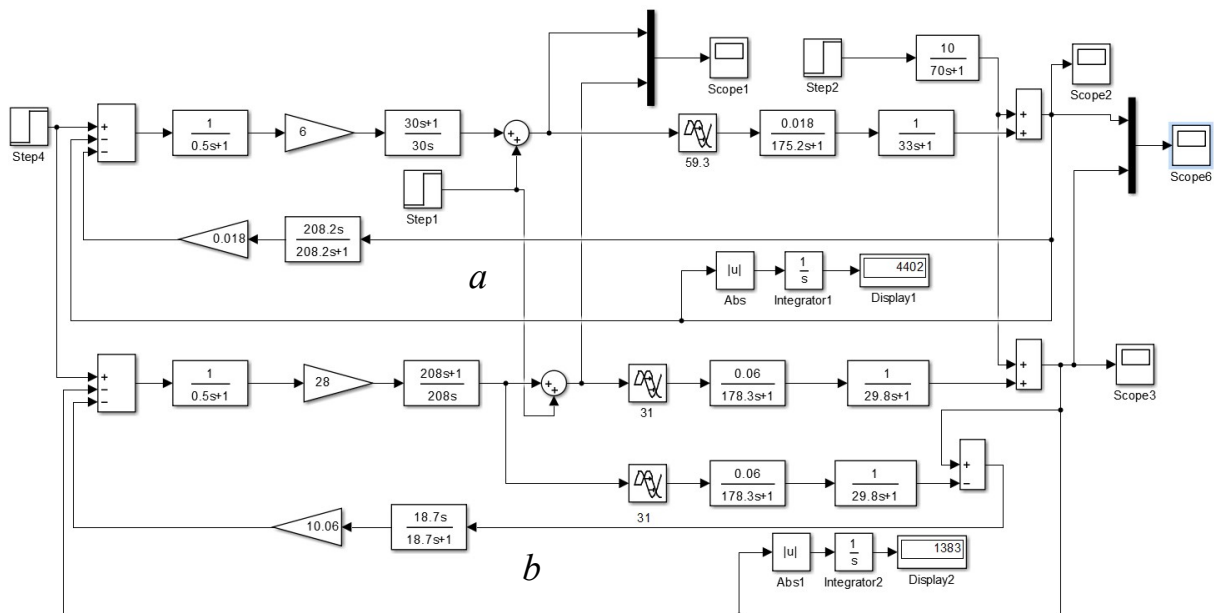


Рисунок 1 – Структурные схемы моделирования переходных процессов штатного РТПК (*a*) и предлагаемой ИСАР (*b*) при максимальной нагрузке котла

Расчет параметров оптимальной динамической настройки ПИ-регулятора ИСАР произведен по методу полной компенсации в частном виде с использованием передаточной функции объекта регулирования:

$$W_1(p) = \frac{k_1 e^{-\tau_{y1} p}}{(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)} = \frac{0,018 e^{-59,3 p}}{(175,2 p + 1)(33 p + 1)}$$

В результате передаточная функция идеального ПИ-регулятора примет следующий вид:

$$W_{pl}(p) = \frac{k_{pl}(T_{ил} p + 1)}{T_{ил} p} = \frac{48,8(208,2 p + 1)}{208,2 p}$$

где $T_{и1} = T_{к1} = T_1 + \sigma_1 = 208,2$ с.

Коэффициент передачи регулятора рассчитываем при коэффициенте демпфирования $\zeta_2 = 1$, что обеспечивает устранение перерегулирования при отработке скачка задания по следующей формуле:

$$K_{p1} = \frac{T_1}{4\zeta_2^2 K_1 \tau_y} = \frac{208,2}{4 \cdot 0,018 \cdot 59,3} = 48,8 \quad [1].$$

С учетом времени демпфирования $T_{демпф} = 0,5$ с идеальный ПИ-регулятор превращается в реальный ПИ-регулятор:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p1}(T_{и1}p + 1)}{T_{и1}p(T_{демпф}p + 1)}.$$

Параллельно реальному объекту формируем его полную математическую модель:

$$W_1^{мод}(p) = W_1(p) = \frac{K_1 e^{-\tau_y p}}{(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)}.$$

Разницу между регулируемой величиной и выходом полной модели объекта

$\Delta = y - y_m$ подаем на вход дифференциатора инвариантности с

передаточной функцией вида: $W_D(p) = \frac{K_D T_D p}{T_D p + 1}$, выход которого со

знаком минус подаем на вход реального ПИ-регулятора. При этом расчет параметров динамической настройки дифференциатора инвариантности внешнего возмущения производим по формулам:
 $T_D = 0,09 T_K = 0,09 \cdot 208,2 = 18,7$ с;

$$K_D = \frac{T_K}{T_D} - 1 = \frac{208,2}{18,7} - 1 = 10,1 \quad [2].$$

Графики переходных процессов штатного РТПК и предлагаемой ИСАР с реальным ПИ-регулятором при отработке основных воздействий приведены на рисунке 2.

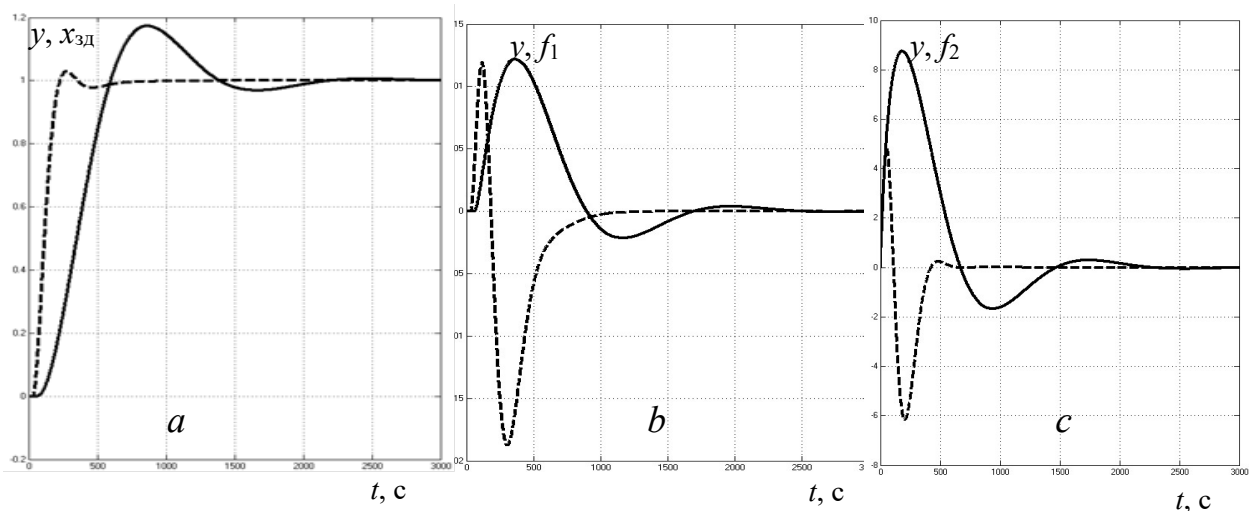


Рисунок 2 – Графики переходных процессов штатного РТПК (сплошные кривые) и предлагаемой ИСАР (штриховые кривые) при обработке скачка задания (*a*), внутреннего (*b*) и внешнего (*c*) возмущений

Из анализа графиков переходных процессов, изображенных на рисунке 2, следует, что ИСАР обеспечивает уменьшение времени отработки скачка задания в 2 раза по сравнению со штатным РТПК. При этом существенно (в 4,5 раза) уменьшается перерегулирование в ИСАР по сравнению со штатной РТПК (рисунок 2, *a*).

При отработке внутреннего возмущения f_1 (рисунок 2, *b*) время регулирования ИСАР уменьшает в 2 раза (штриховая кривая) по сравнению со штатным регулятором тепловой производительности котла (сплошная кривая). Для достижения полной инвариантности по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению, измеряемому дополнительным датчиком, выход которого поступает на вход устройства компенсации этого возмущения с передаточной функцией, обратной передаточной функции реального ПИ-регулятора, выход которого, в свою очередь, подается на вход основного регулятора. При отработке внешнего возмущения ИСАР обеспечивает уменьшение времени регулирования в 2,5 раза (штриховая кривая) по сравнению со штатным РТПК (сплошная кривая), а максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшается на 32 % (рисунок 2, *c*).

Вышеизложенное позволяет рекомендовать ИСАР тепловой производительности котла для широкого внедрения на ТЭС ГПО «Белэнерго».

1. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 197 с.
2. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие / Г.Т. Кулаков. – Мн.: Вышэйшая школа, 1984. – 192 с.

КРИТЕРИИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Лобатый А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В теории статистической динамики систем автоматического управления значительное место занимают задачи оптимального оценивания (фильтрации) результатов измерений с целью уменьшения влияния случайных факторов. Широко известные алгоритмы оптимального оценивания основаны на рассмотрении математических моделей оцениваемых процессов и измерителей. Точные решения получаются для линейных математических моделей с аддитивными случайными функциями в виде белых шумов (фильтр Калмана). Любые другие модели (нелинейные, с «цветными» шумами) с помощью различных преобразований сводятся к классическому виду.

При аналитическом синтезе алгоритмов оценивания в качестве критериев оптимизации рассматривают минимум среднего квадрата ошибки оценивания или максимум апостериорной условной плотности вероятности. Исходными уравнениями при этом служат интегральное уравнение Винера-Хопфа или дифференциальное уравнение Стратоновича-Кушнера. Существуют специфические особенности оценивания процессов в многомерных сложных системах и процессов в стохастических системах, функционирующих в различных режимах, изменяющихся случайным образом.

Не смотря на то, что теория оптимального оценивания получила достаточное развитие и занимает неотъемлемое место в современной теории автоматического управления, существуют проблемы практического применения данной теории при решении прикладных инженерных задач. Эти проблемы обусловлены тем обстоятельством, что проблематично, и часто невозможно достичь адекватности математических моделей систем их реальным физическим прототипам.

Следовательно, важнейшей задачей, стоящей перед теоретиками и практиками, является структурная (непараметрическая) и параметрическая идентификация стохастических динамических систем, которая состоит в определении вида уравнений состояния систем и значений параметров этих уравнений.

Успешное решение задач идентификации дает возможность путем компьютерного моделирования проводить исследования систем практически любой сложности в любых условиях, позволяет не только экономить значительные ресурсы, но и решать задачи анализа и синтеза, которые другими способами решить практически невозможно.

МОДУЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ляшевич М.С., Гутич И.И.

Белорусский национальный технический университет
г.Минск, Республика Беларусь

Современная энергетика активно внедряет цифровые технологии, среди которых важное место занимает искусственный интеллект. Использование искусственного интеллекта открывает новые возможности для анализа данных, прогнозирования, оптимизации процессов и принятия решений, что особенно важно в условиях растущего энергопотребления.

Всё чаще требуется представлять энергообъекты и их оборудование как информационные модели. Это позволяет использовать телеметрию, рассчитывать релейные режимы, создавать автоматизированные заявки на ремонт. В Республике Беларусь схемы энергообъектов представлены в виде графических документов, а их преобразование в информационные модели выполняется вручную специалистами.

Для автоматизации этого процесса предлагается рассмотреть систему, основанную на использовании методов искусственного интеллекта. Искусственный интеллект позволяет распознавать классы энергообъектов, их оборудование и взаимосвязи, автоматически преобразовывая графические схемы в информационные объекты. Такой подход сократит трудозатраты, повысит точность преобразования данных и ускорит моделирование энергетических систем.

Конечный модуль состоит из нескольких компонентов:

Компонент предварительной обработки изображений

Обеспечивает преобразование данных в графическое представление, необходимое для дальнейшей работы с диаграммами и обучения моделей нейронных сетей. Позволяет преобразовать данные из формата “.PDF” в формат “.PNG” с конвертацией изображения в оттенки черного.

Компонент определения связей между объектами

Данный компонент решает задачу автоматического составления перечня связанных между собой энергетических объектов. На схемах подстанций связанное оборудование обозначают при помощи кабеля, соединяющего графические элементы между собой. Определения связей в предполагаемом модуле осуществляется путём использования алгоритма Хафа для прямых линий. Исходное изображение разбивается на сегменты, в пределах которого выявляются все прямые линии с указанной точностью. Найденные линии соединяются по признаку пространственной смежности, формируя цельный кабель, по которому становится возможно определить связь между элементами схемы.

Сверточная нейронная сеть

Для автоматического определения классов энергетических объектов предлагается использовать нейронную сеть Faster R-CNN из фреймворка PyTorch [1].

После обучения на множестве данных графических элементов, Faster R-CNN способна распознавать на предоставленном изображении области содержания энергетических объектов с указанием координат этой области и наименования класса оборудования.

Компонент распознавания диспетчерских наименований

Кроме графических элементов на схеме подстанции содержатся диспетчерские наименования каждого из представленных элементов энергооборудования. С помощью использования Tesseract OCR решается задача определения текста на изображении, а именно: диспетчерских наименований и классов напряжений на схемах подстанций [2].

Компонент формирования XML-документа, описывающего графическую схему подстанции на основе методологии CIM [3].

В рамках данного компонента происходит сопоставление описания распознанного энергетического объекта в формате “JSON” с шаблонным представлением класса этого энергетического объекта в методологии CIM.

Компонент интеграции

Для визуализации полученного результата необходимо использовать визуальный редактор, поддерживающий импорт информационных объектов в формате CIM. Интеграционная составляющая построена на основе Public API, что позволяет связать предполагаемый модуль с программным комплексом “СК-11”.

Графический интерфейс приложения

Представлен главным окном программного продукта с возможностью загрузки исходной схемы подстанции. Перед загрузкой предоставляется возможность обрезать изображение или изменить его масштаб в установленных пределах.

В рамках данной научной статьи был представлен модуль автоматизированного распознавания функциональных элементов энергетических объектов с использованием нейронной сети Faster R-CNN от PyTorch.

1. Документация Faster R-CNN от PyTorch [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pytorch.org/vision/master/models/faster_rcnn.html.
2. Документация Tesseract OCR [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tesseract-ocr.github.io>.
3. IEC 62325-301. Описание модели CIM [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/en/publication/31487>.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЯГКИХ ЗАХВАТОВ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Марченко И.С., Гармаза Д.И., Ходатович А.С.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск Республика Беларусь.

Мягкие захваты являются приоритетной альтернативой жёстким захватам в тех применениях, когда требуется работа с объектами нестандартизированной формы, например задача сортировки в пищевой промышленности. Принцип работы мягких захватов основан на использовании гибких материалов, способных деформироваться при воздействии. Примером такого материала служит силикон: отливка из него определённой формы позволяет ему изгибаться при подаче давления. Это свойство делает их идеальными для использования в отраслях, где требуется бережное обращение, например пищевая промышленность, косметика и фармацевтика,

В рамках расширения вариативности захватов материально-учебной базы кафедры «Робототехнические системы» факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета за счёт собственных разработок был изготовлен прототип мягкого захвата для использования в рамках учебных программ. Он состоит из отдельных силиконовых пальцевидных модулей, установленных на металлическую пластину, которая крепится к фланцу манипулятора. Благодаря унифицированному крепежу, использовать захватный модуль можно на ряде промышленных коллаборативных роботов, таких как UNIVERSAL ROBOT UR-3, UR-5 и Techman TM5-700. Крепёж сделан из нержавеющей стали 03X17H14M3 по ГОСТ 5632-72 позволяет повысить безопасность работы с пищевыми продуктами.

Целью данной работы ставилась разработка и создание аналога промышленной версии мягкого захвата, который не будет уступать ему по техническим характеристикам. Также, использование данного захватного модуля позволяет студентам углубить профессиональные знания и развить практические навыки работы с современным промышленным оборудованием.

Перед началом работ, были проанализированы существующие промышленные решения. На их основе были разработаны модели необходимых деталей захвата. Для всех моделей была проведена симуляция рабочих и предельных нагрузок. Для деталей из силикона были изготовлены сборные отливочные формы.

Отливку пальцев захвата с наименьшей номенклатурой оборудования приходится проводить в два этапа: отливка внешней части с полостями для сжатого воздуха и пластиковой вставкой для подключения цангового фитинга; отливка внутренней части захвата для контакта с объектом.

Таким образом внутри модели формируется герметичный контур, подходящий для включения в пневматическую линию.

Применяемый двухкомпонентный силикон на основе платины, подходящий для пищевых применений, преподносится производителем как заливаемый при атмосферном давлении без усадки. Однако проведя экспериментальные отливки с выдержкой 10 минут перед заливкой при атмосферном давлении; поместив в вакууматор с давлением в -0,6 Бар; с давлением

в 0,8 Бар не получилось достигнуть полной дегазации смеси компонентов ни в одном из перечисленных случаев. Качество отливок всё же имеет значительные отличия. Отливка, сделанная из смеси без дегазации, имела непролитые полости, что не помешало ей работать при номинальном расчётном давлении в 0,6 Бар, но привело к разрыву при давлении в 1,2 Бар. Две оставшиеся отливки качественно отличались от первой плотностью, будучи ближе к номинальной в 40 Шор.

Для подключения такого захвата необходим вакуумный генератор, источник сжатого воздуха и пневматический распределитель, управляемый соленоидами, которые необходимо подключить к выходам контроллера робота.

Таким образом был изготовлен мягкий захват, позволяющий деликатно перемещать предметы не требующий дополнительных интерфейсов для подключения. Полученная технология позволяет изготавливать захват на минимальном количестве оборудования, следовательно с меньшими экономическими затратами.

1. Митусов, А. Гидравлические и пневматические системы (расчет и проектирование) : учеб. пособие / А. Митусов, О. Решетникова. – 2-е изд., доп. – Нур-Султан : Фолиант, 2017. – 192 с.
2. Deebekaa, P. Design, Modelling and Analysis of Soft Gripper for Material Handling / P. Deebekaa, V. Meenakshi Priya, G. Kalaiarassan // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2018. – Vol. 6. – P. 2411-2417.
3. Zhou, Y. Modeling of Soft Robotic Grippers Integrated With Fluidic Prestressed Composite Actuators / Y. Zhou, L. M. Headings, M. J. Dapino // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2022. – Vol. 14. – P. 1-13.
4. Нагорный, В. С. Гидравлические и пневматические системы : учеб. пособие для СПО / В. С. Нагорный. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 444 с.
5. Рачков, М. Ю. Пневматические системы автоматике : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Рачков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2023. – 264 с.
6. Макаров, В. А. Пневматические и гидравлические мехатронные системы : учеб. пособие / В. А. Макаров, Ф. А. Королев. – М. : РТУ МИРЭА, 2021. – 71 с.

ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ ЯЧЕЙКА НА БАЗЕ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА

**Марченко И.С.¹, Матрунчик Ю.Н.¹, Боровко И.О.²,
Коваленко В.С.², Серов М.П.²**

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

Наиболее распространенная и наиболее нуждающаяся в роботизации задача – это упаковка и паллетирование. Прежде чем какой-либо продукт покинет фабрику или предприятие, вполне вероятно, что перед отправкой ему потребуется какая-либо упаковка. Задачи по упаковке и укладке на поддоны (паллеты) могут включать упаковку продукта путем помещения его в упаковочную машину с термоусадочной пленкой, сбор упакованных продуктов с конвейерной ленты и укладка их в коробки с последующей установкой эти коробок на поддон для отправки.

В рамках реализации индивидуальной учебной программы дополнительного образования одаренных детей и молодежи для дистанционной формы получения образования по направлению «Робототехника» Учреждения образования «Национальный детский технопарк» разрабатывается промышленная роботизированная ячейка на базе коллаборативного робота.

Актуальность программы обусловлена необходимостью изучения возможности внедрения промышленных коллаборативных роботов в производственные процессы, такие как механообработка, сборка, паллетирование, упаковка и др.

Цель реализации программы: формирование и развитие знаний, умений и навыков в области промышленной робототехники, опыта планирования, организации и выполнения научно-исследовательской деятельности. Основные задачи: углубить знания об основных принципах и способах программирования промышленных коллаборативных роботов, структуре и компоновке роботизированных ячеек, особенностях их использования при роботизации различных производственных процессов; ознакомить со средствами разработки, тестирования, применения на практике аппаратных и программных средств роботизации, особенностями их использования в интегрированных автоматизированных производственных системах.

Реализация проекта включает в себя следующие этапы:

1-й этап: оценка эффективности использования роботизированных ячеек на базе коллаборативных роботов в различных отраслях производства Республики Беларусь;

2-й этап: изучение требований к промышленным роботам и вспомогательному оборудованию робототехнических систем;

3-й этап: изучение существующих аналогов роботизированных ячеек и подбор подходящей модели прототипа в качестве исходной базы для проектирования;

4-й этап: разработка трехмерной модели роботизированной ячейки с учетом комплектации и функционала;

5-й этап: создание алгоритмического и программного обеспечения для управления роботизированной ячейкой под задачу упаковки и паллетирования продукции производства;

6-й этап: анализ дополнительных возможностей, которые предоставляет разработанная роботизированная промышленная ячейка на базе коллаборативного робота;

7-й этап: формулирование выводов по результатам выполнения проекта и перечня предложений по использованию результатов проекта в образовательном и производственном процессах.

Реализация проекта позволит:

1. создать трехмерные модели и электрические принципиальные схемы системы управления роботизированной производственной ячейки на базе коллаборативного робота;

2. разработать программное обеспечение, позволяющее реализовывать алгоритмы управления роботизированным оборудованием под различные производственные задачи, в частности под задачи упаковки и паллетирования грузов (заготовок, сборочных узлов, готовой продукции);

3. предложить новые решения и идеи в сфере промышленной робототехники, с акцентом на ее экономичность и доступность для учреждений образования и промышленных предприятий.

1. Макаров, В. А. Пневматические и гидравлические мехатронные системы : учеб. пособие / В. А. Макаров, Ф. А. Королев. – М. : РТУ МИРЭА, 2021. – 71 с.
2. Макаров, И. М. Робототехника: История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчев. – М. : Наука; Изд-во МАИ, 2013. – 349 с.
3. Максфилд, К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы : курс молодого бойца / К. Максфилд ; пер. В. М. Барской. – М. : ДМК Пресс, Додэка-XXI, 2015. – 407 с.
4. Нагорный, В. С. Гидравлические и пневматические системы : учеб. пособие для СПО / В. С. Нагорный. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 444 с.
5. Рачков, М. Ю. Пневматические системы автоматики : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Рачков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2023. – 264 с.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДЕЛЬТА-РОБОТА С РАЗОМКНУТЫМ КОНТУРОМ УПРАВЛЕНИЯ

**Матрунчик Ю.Н., Марченко И.С.,
Слизавский М.О., Вороник Л.Ч.**

Белорусский национальный технический университет
г. Минск Республика Беларусь;

В современном мире автоматизация становится необходимой частью технологического прогресса. Это дает толчок для развития роботизации. Одним из перспективных направлений в этой области является разработка дельта-роботов. Эти устройства, благодаря своей высокой скорости и точности, могут применяться в различных отраслях, например, в таких, как промышленность (для сортировки и упаковки), медицина (в фармацевтике и даже хирургии), логистика (эффективное складирование) и в 3D-печати. Особо важным становится обучение сборке и программированию подобных роботов, ведь данные навыки способствуют подготовке специалистов, умеющих решать сложные задачи в области робототехники [3].

Дельта-роботы представляют собой параллельные манипуляторы, характеризующиеся высокой точностью и скоростью выполнения операций. Их конструкция состоит из легких рычагов и шарниров, что позволяет минимизировать инерцию и увеличить производительность [2]. В данной статье рассматриваются основные особенности разработки дельта-робота, включающие программно-аппаратную систему управления, электромеханическую часть и практические результаты, достигнутые в ходе реализации проекта.

Разработка программно-аппаратной системы управления движением дельта-робота является одной из ключевых задач при его разработке. Эта система включает в себя микроконтроллер, приводы двигателей, датчики обратной связи и программное обеспечение для обработки данных и управления движением. Микроконтроллер обеспечивает управление шаговыми двигателями, используемые для перемещения робота [1]. Это позволило реализовать точное позиционирование рабочего инструмента робота в трехмерном пространстве.

Особое внимание уделялось разработке алгоритмов управления. Для достижения плавного и точного движения робота были применены методы обратной кинематики, позволяющие преобразовать координаты целевой точки в углы поворота двигателей. Эти методы основаны на математических моделях, которые учитывают геометрические параметры конструкции робота и позволяют рассчитать необходимые значения для выполнения задач.

Электромеханическая часть дельта-робота включает в себя конструкцию из легких алюминиевых рычагов, шарниров и шаговых

двигателей, которые обеспечивают достаточные для первого прототипа момент и точность позиционирования. Конструкция была разработана с учетом минимизации массы подвижных частей, что позволило увеличить скорость и грузоподъемность робота. Для управления движением использовалась разомкнутая система, что упростило конструкцию и снизило стоимость проекта. Однако это потребовало тщательной калибровки двигателей.

В ходе проекта была разработана, изготовлена и собрана конструкция дельта-робота. Для этого использовались доступные материалы и компоненты: алюминиевые профили, 3D-печатные детали и стандартные электронные модули. Для питания системы был выбран блок питания на 24 В, что обеспечило стабильную работу всех компонентов.

В результате был создан рабочий прототип дельта-робота, способный выполнять простые операции по перемещению объектов в заданные точки. Это также подтвердило возможность использования доступных компонентов для создания функционирующих робототехнических систем с целью обучения специалистов.

Разработка дельта-робота является актуальной задачей, результат решения которой не только создает эффективное устройство для автоматизации процессов, но и способствует обучению специалистов в области робототехники. В ходе проекта была успешно спроектирована конструкция робота, разработана система управления и проведены испытания, подтвердившие работоспособность устройства.

Дальнейшее развитие проекта может заключаться в преобразовании системы управления в замкнутую с использованием абсолютных датчиков угла поворота для повышения точности, добавлении системы технического зрения для расширения возможностей робота. А использование синхронных двигателей с постоянными магнитами поможет решить проблемы пропуска шагов и уменьшения момента двигателя при увеличении точности.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования дельта-роботов в промышленности и важность подготовки специалистов, способных разрабатывать и внедрять подобные системы.

1. Бачинин, А. Основы программирования микроконтроллеров / А. Бачинин, В. Панкратов, В. Накоряков. – ООО «Амперка», 2013. – 207с.
2. Садилов М. Д., Тимофеев Г. А. Моделирование движения дельта-робота по заданной траектории //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – №. 11 (740). – С. 22-30.
3. Костин С. В. Особенности применения робототехнических комплексов на базе дельта-роботов //Science and world. – 2013. – С. 43.

ТРЕХКООРДИНАТНАЯ ЮСТИРОВКА ОСНОВНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ИНСТРУМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Матрунчик Ю.Н., Семижон Е.Д.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск Республика Беларусь.

В настоящее время ведущие производители промышленных роботов-манипуляторов сумели достичь внушительной повторяемости позиционирования (от 0.02 до 0.06 мм) у конструируемых ими машин. Этого уже достаточно для использования их в сфере пространственной механообработки, прецизионного позиционирования и сборки ответственных деталей конструкций, ассистирования при хирургических операциях, пространственного нанесения вязких веществ.

Для применения роботов-манипуляторов в подобных сферах одной лишь их повторяемости позиционирования недостаточно. Важно также соответствие позиции и ориентации основной воздействующей точки инструмента, называемой также в зарубежных источниках^[3] POI / TSP – point of interest / tool center point соответственно, обязательно задаваемым в контроллер промышленного робота параметрам этого инструмента. При использовании шестиосевого манипулятора в число этих параметров обычно входят X, Y, Z – определяют смещение TSP относительно заранее определённой изготовителем точки на фланце робота (обычно центр внутреннего посадочного отверстия в плоскости фланца – базовый TSP), а также O, A, T или R, P, Y. Последние по-разному высчитываются, однако обозначают в сущности одно и то же – ориентацию TSP в пространстве относительно базовой системы координат робота.

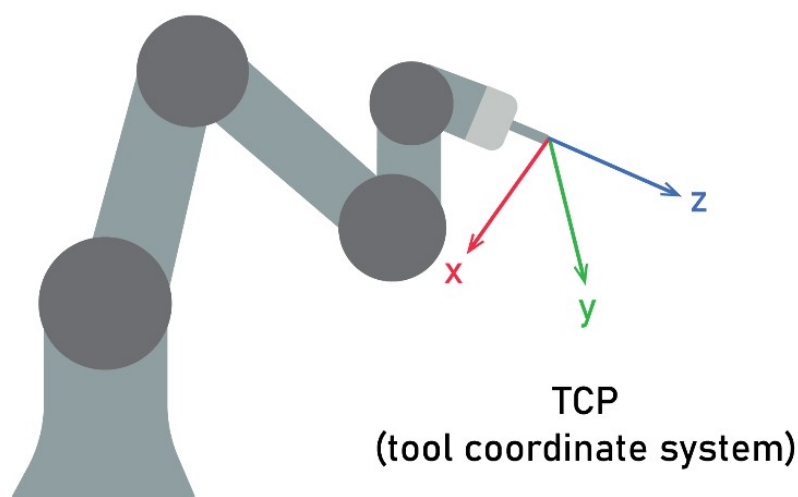


Рисунок 1 - Схема расположения TSP

Большинство промышленных решений включающих использование роботов-манипуляторов построены на базе применения их в качестве элемента перемещения некоторого инструмента, который ранее перемещался при помощи человека, однако по мере развития технологического прогресса такой способ перемещения стал либо недостаточным по характеристике его качества для того или иного технологического процесса, либо невозможным. В связи с этим можно утверждать, что ориентация инструмента в пространстве, при прямом, либо косвенном его закреплении на фланце робота обусловлена конструктивной особенностью самого инструмента и остаётся постоянной при нормальном режиме работы манипулятора и обеспеченной жесткости закрепления того самого инструмента. Это говорит нам о том, что обязательные к вводу в контроллер робота параметры O, A, T или R, P, Y остаются постоянными и не требуют изменения до момента смены закрепляемого на фланце манипулятора инструмента.

Параметры TCP X, Y, Z могут требовать как единоразовой, так и периодической их юстировки в системе координат инструмента манипулятора. Трёхкоординатной юстировкой TCP по параметрам X, Y, Z называется совокупность операций по автоматическому переопределению смещения рабочей точки инструмента относительно базового TCP. Юстировка производится единоразово том случае, если основная рабочая точка инструмента и сам инструмент существуют неразрывно и жёстко связаны друг с другом. В таком случае юстировка нужна лишь для уточнения предварительно введённых параметров X, Y, Z в контроллер манипулятора. Однако часто бывает так, что на закрепляемом на фланец робота инструменте существует некоторый интерфейс, позволяющий быстро менять рабочий элемент в соответствии с предъявляемыми технологическим процессом к оснастке требованиями, либо в случае быстроизнашиваемости основного рабочего элемента. В таком случае поставщик робототехнического комплекса обязан позаботиться о наличии в зоне досягаемости манипулятора поста юстировки для периодического переопределения TCP в случае замены рабочего элемента инструмента.

1. Small-to-medium, general-purpose robots / kawasakirobotics.com; URL: https://kawasakirobotics.com/uploads/sites/2/2022/01/RS_E_220523.pdf (дата обращения: 30.01.2025).
2. Robotics_Range // kuka.com; URL: www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/87f2706ce77c4318877932fb36f6002d/kuka_robotrange_en.pdf?rev=2359724cb3a447a78aa636bfe3a0d5bf (дата обращения: 30.01.2025).
3. Define a Tool (TCP); // robodk.com URL: <https://robodk.com/doc/en/General-Define-Tool-TCP.html> (дата обращения: 30.01.2025).

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОКРУЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ

**Матрунчик Ю.Н.¹, Прохорович С.С.¹,
Дубатовка В.В.², Иванченко М.А.²**

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

В последнее время всё большую актуальность приобретает позиционирование мобильных платформ при автоматизации процессов транспортировки. Особой задачей является контроль среды вокруг объекта. Определение препятствий и контроль за состоянием поверхности пути следования.

Исследовательский проект реализуется в рамках освоения индивидуальной учебной программы дополнительного образования одаренных детей и молодежи для дистанционной формы получения образования по направлению «Робототехника» Учреждения образования «Национальный детский технопарк» и посвящен актуальному вопросу разработки автоматической системы идентификации окружающих объектов для роботизированной карьерной техники. Данная тематика современна и актуальна для Республики Беларусь. Кроме того, остро стоит вопрос подготовки кадров в сфере конструирования, программирования и эксплуатации роботизированных систем и устройств для карьерной техники.

Актуальность программы обуславливается тенденцией развития робототехники в направлении автоматизации технологических процессов в горнодобывающей отрасли. С развитием технологий роботизированных систем в различных отраслях промышленности, особенно в горнодобывающей и строительной, возникает критическая потребность в эффективных системах идентификации окружающих объектов. Это позволяет роботам лучше ориентироваться в сложном рабочем пространстве, избегать столкновений с препятствиями и более точно выполнять поставленные задачи.

Образовательная программа охватывает ключевые аспекты разработки таких систем, включая машинное зрение, обработку изображений, алгоритмы распознавания объектов и интеграцию с роботизированными системами. Учитывая стремительное развитие этой области, знания и навыки, полученные при прохождении такой программы, будут высоко востребованы на рынке труда и в научно-исследовательской деятельности.

Проект включает в себя следующие этапы:

выбор и настройка операционной системы для программирования робототехнических систем и устройств Linux, ROS;

разработка системы технического зрения (далее – СТЗ), выбор камер для СТЗ, настройка и калибровка камер;

изучение существующих аналогов роботизированных устройств позиционирования для камер технического зрения и веб - камер и подбор подходящей модели прототипа в качестве исходной базы для проектирования;

разработка трехмерной модели проектируемой системы в целом с учетом комплектации и функционала мобильной части системы и СТЗ;

создание алгоритмического и программного обеспечения для управления системой идентификации окружающих объектов для роботизированной карьерной техники;

анализ дополнительных возможностей, которые предоставляет разработанная роботизированная система;

формулирование выводов по результатам выполнения проекта и перечня предложений по использованию результатов проекта.

Реализация проекта позволит: создать трехмерные модели и электрические принципиальные схемы управления системой идентификации окружающих объектов для роботизированной карьерной техники; разработать программное обеспечение, позволяющее реализовывать алгоритмы идентификации окружающих объектов; предложить новые решения и идеи в области автоматизации процесса идентификации окружающих объектов и роботизации процесса позиционирования СТЗ для карьерной техники, с акцентом на ее экономичность и доступность.

Данная тематика исследований соответствует перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы.

1. Бачинин, А. Основы программирования микроконтроллеров / А. Бачинин, В. Панкратов, В. Накоряков. – ООО «Амперка», 2013. – 207с.
2. Методы выделения контуров на изображении [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://kpi.kharkov.ua/archive/MicroCAD/2012/S8/МЕТОДЫ%20ВЫДЕЛЕНИЯ%20КОНТУРОВ%20НА%20ИЗОБРАЖЕНИЯХ.pdf>.
3. Охоцимский, Д. Е. Новые задачи динамики и управления движением мобильных колесных роботов / Д. Е. Охоцимский, Ю. Г. Мартыненко – Москва: Успехи механики. – 2013. – Т. 2, № 1. – С. 347.
4. Ревич, Ю.В. Занимательная электроника. - 6-е изд., перераб. и доп. – СПб.:БХВ-Петербург, 2021.-688с.:ил.
5. Сажнев, А. М. Цифровые устройства и микропроцессоры: учеб. пособие для академ. бакалавриата : для студ. вузов, обучающихся по инж.-техн. направлениям / А. М. Сажнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2018. – 139 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ТУРКМЕНИСТАНА

Мередова Х.А., Ашыров А.И., Курбанова М.А.

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
Ашхабад, Туркменистан.

Инновационные технологии, используемые сегодня во всех сферах жизни, широко применяются и в сельскохозяйственном секторе. Широкое использование технологий повлияло на положение сельскохозяйственного сектора в мировой экономике. Использование технологий сократило человеческий труд в сельском хозяйстве и значительно повысило эффективность производства.

Уровень производительности сельскохозяйственной отрасли повышается за счет совершенствования технологий, повышения эффективности и расширения знаний.

В Туркменистане использование инновационных технологий в аграрном секторе является важным, самодостаточным и необходимым фактором отрасли. Для удовлетворения растущего спроса в сельском хозяйстве все чаще используются технологии искусственного интеллекта, известные как «умное сельское хозяйство» [1].

В нашей стране планируется увеличить объемы сельскохозяйственного производства и производить полезные продукты питания за счет использования технологий искусственного интеллекта. Цифровая сельскохозяйственная система позволяет использовать сельскохозяйственные технологии, которые могут быть полезны в таких областях, как посадка, орошение, борьба с болезнями и погодными условиями. Автономные роботы и дроны, датчики — все это компоненты этой технологии.

Приложения искусственного интеллекта в сельском хозяйстве можно разделить на несколько групп. К ним относятся наблюдение и прогнозирование, мониторинг земель и урожая, а также сельскохозяйственные роботы.

В настоящее время ведутся исследования по использованию новых сельскохозяйственных роботов. Применения роботов в сельском хозяйстве можно разделить на наружных и внутренних роботов. Внутренние роботы в основном используются в пищевой промышленности. Наружные роботы используют новейшие сельскохозяйственные технологии и оснащены такими устройствами, как камеры, датчики и навигация. Эти роботы, которые часто используются для сбора урожая фруктов и овощей, обладают функцией автоматической обработки урожая. В категорию наружных роботов также входят роботы для посева, орошения, обработки, прополки, выпаса скота и заготовки силоса [2].

Использование роботов снижает затраты на продукцию, а быстрая окупаемость инвестиций в робототехнику превышает первоначальные затраты на ремонт оборудования. С роботами увеличиваются скорость и объем производства, сокращается время цикла работы. Автоматизированный робот имеет возможность работать с постоянной скоростью, не отвлекаясь на отдых, расслабление и сон. В результате появляется больше возможностей произвести максимальную продукцию в кратчайшие сроки. С роботами повышается качество и надежность продукции, все процессы выполняются с высокой точностью. Это гарантирует создание продуктов с едиными спецификациями и снижает потребность в обслуживании. Производственная площадь используется более эргономично, уменьшая рабочую площадь за счёт автоматизации производственной линии, позволяет использовать площадь для других операций.

Роботы настолько точны, что можно сократить количество используемого сырья, что означает снижение затрат. Автоматизированное производство более гибко реагирует на изменения спроса и потребностей потребителей. Роботизация многих процессов помогает обеспечить максимальную производительность при минимальных затратах. Эта технология подходит для повторяющихся производственных циклов, успешно заменяет человека-оператора в любых условиях и выдерживает самые большие нагрузки [3].

Туркменистан в последнее время также проводит политику повышения эффективности сельского хозяйства путем сочетания традиционных методов с современными технологиями. Реализуются проекты совместно с Организацией по безопасности и сотрудничеству в Европе (ОБСЕ) по смягчению последствий изменения климата и управлению водными ресурсами.

Целью является цифровизация сельского хозяйства в Туркменистане, использование точных агротехнических систем и передовых агротехнических приемов, создание благоприятных возможностей для бизнеса, сокращение человеческого труда в сельском хозяйстве и повышение производительности. Наряду с правительством Туркменистана частный сектор страны также использует новейшие технологии в сельском хозяйстве для экономии времени и энергии.

1. Атаев А. / Использование современных инновационных технологий //Нейтральный Туркменистан. – 2024 - №132 (29492) - 4.
2. Robotlaryň ulanylmagynyň ähmiýeti / Nazarow K. <https://centralasia.news> (20.01.2025)
3. Oba hojalygynda adam zähmetiniň ýeňilleşmegi / Geldimyradow H. <https://turkmenportal.com/blog/> (18.01.2025)

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

**Напрасников В.В.¹, Бородуля А.В.¹, Полозков Ю.В.¹,
Соловьев А.Н.²**

1) Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь;

2) Крымский федеральный университет
Симферополь, Российская Федерация.

Целью настоящей работы является создание программной реализации одного из способов учета кинематических граничных условий при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая возникает в задаче расчета конструкций методом конечных элементов в случае статических нагрузений и тестирование соответствующей процедуры.

Для тестирования используем пример стержня, подверженного растяжению – сжатию, конечно-элементная схема которого представлена на рисунке 1. В схему включены два конечных элемента и три узла (узлы на рисунке отображены черными кружками и расположены на концах конечных элементов).

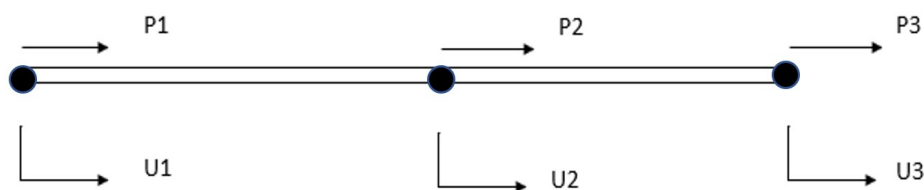


Рисунок 1. Расчетная конечно-элементная схема

В схеме присутствуют три степени свободы, перемещения по которым обозначены как U_1, U_2, U_3 , а приложенные по этим степеням свободы силы обозначены как P_1, P_2, P_3 . Стрелками указаны положительные направления для этих величин.

Тогда при упрощенных предположениях результирующая СЛАУ, полученная после рассылки компонентов матриц жесткостей отдельных элементов на соответствующие места в глобальную матрицу жесткостей, будет иметь вид

$$K\vec{U} = \vec{P}, \text{ где } K = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \vec{U} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix}, \vec{P} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}.$$

Заметим, что определитель матрицы левой части СЛАУ равен нулю $\det(K) = 0$. Это означает, что пока конструкция не закреплена она может перемещаться как жесткое целое под действием внешних нагрузок.

На рисунке 2 представлен вид программной реализации процедуры этого метода в среде MATHCAD.

ORIGIN := 1

Способ аппроксимации учета граничных условий

$$\text{boundCond3}(A,B,\text{ind},\text{val}) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{ind}) \\ \left| \begin{array}{l} A_{\text{ind}_i, \text{ind}_i} \leftarrow A_{\text{ind}_i, \text{ind}_i} \cdot 10^6 \\ B_{(\text{ind}_i)} \leftarrow A_{\text{ind}_i, \text{ind}_i} \cdot \text{val}_i \end{array} \right. \\ \text{lsolve}(A,B) \end{array} \right.$$

Рисунок 2. Программная реализация метода в среде MATHCAD.

Рассмотрим в качестве тестов три случая, когда некоторые компоненты вектора перемещений заданы, что соответствует закреплению конструкции, и при этом известны компоненты вектора нагрузок, которые подберем так, чтобы можно было предвидеть перемещения узлов по соответствующим степеням свободы.

Случай 1. $U_3 = -1$ $P_1 = 0$ $P_2 = 0$ $P_3 = 0$

В этом случае в решении значения оставшихся переменных должны быть $U_1 = -1$, $U_2 = -1$.

Результаты тестирования представлены на рисунке 3.

<p>Исходная матрица коэффициентов СЛАУ из МКЭ старжи 2 элемента растяжение-сжатие</p> $K := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$ <p>Индексы известных переменных U_i</p> <p><u>ind</u> := (3)</p> <p><u>U</u> := boundCond3(K,P,ind,val)</p>	<p>$K = 0$</p>	<p>Вектор правой части</p> $P := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ <p>Известные значения переменных U_i</p> <p>val := (-1)</p> $U = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad K \cdot U = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
---	-----------------------------	---

Рисунок 3. Результаты тестирования для случая 1.

Случай 2. $U_2 = 0$ $P_1 = -1$ $P_2 = 0$ $P_3 = 1$

В этом случае в решении значения оставшихся переменных должны быть

$$U_1 = -1, \quad U_3 = 1.$$

Результаты тестирования представлены на рисунке 4.

Исходная матрица коэффициентов СЛАУ из МКЭ старжи 2 элемента растяжение-сжатие	Вектор правой части
$K := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad K = 0$	$P := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Индексы известных переменных U_i	Известные значения переменных U_i
$\text{ind} := (2)$	$\text{val} := (0)$
$U := \text{boundCond3}(K, P, \text{ind}, \text{val})$	$U = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad K \cdot U = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Рисунок 4. Результаты тестирования для случая 2.

Случай 4. $U_1 = 0 \quad P_1 = 0 \quad P_2 = 0 \quad P_3 = 1$

В этом случае в решении значения оставшихся переменных должны быть

$$U_2 = 1, \quad U_3 = 2.$$

Результаты тестирования представлены на рисунке 5.

Исходная матрица коэффициентов СЛАУ из МКЭ старжи 2 элемента растяжение-сжатие	Вектор правой части
$K := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad K = 0$	$P := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
+ Индексы известных переменных U_i	Известные значения переменных U_i
$\text{ind} := (1)$	$\text{val} := (0)$
$U := \text{boundCond3}(K, P, \text{ind}, \text{val})$	$U = \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-6} \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \quad K \cdot U = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Рисунок 5. Результаты тестирования для случая 3.

Вывод. Во всех случаях численные решения соответствуют ожидаемым результатам, что дает уверенность в адекватности реализации метода.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА ДЛЯ СИНТЕЗА УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Несенчук А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Рассматривается интервальная динамическая система (ИДС) [1, 2], свойства которой описываются семейством характеристических полиномов вида

$$g_n(s) = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n, \quad -\infty < a_j < +\infty, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

где $a_j \in \mathbb{R}$.

Задача состоит в определении интервальных подсемейств значений параметров (коэффициентов) (1) в семействе его параметров, обеспечивающих устойчивость системы. Для решения используется совмещенный (расширенный) свободный корневой годограф [2].

Запишем полином (1) для рассматриваемой системы при $n = 3$:

$$s^3 + s^2 + q_1s + q_2 = p(s, q_1, q_2). \quad (2)$$

Согласно материалов [2] запишем расширение E_3 полинома (2):

$$E_3(p(s, q_1, q_2)) = \begin{cases} s^2 + s + q_1 = p_2(s), & (3.1) \\ s^3 + s^2 + q_1s + q_2 = p_3(s). & (3.2) \end{cases} \quad (3)$$

где полином (3.1) является порождающим, а полином (3.2) – порождаемым полиномом [2].

Сгенерируем расширенный корневой годограф для расширения (3). Поскольку свободный корневой годограф полинома (3.1) представляет собой траекторию движения полюсов свободного корневого годографа полинома (3.2), вначале рассмотрим построение годографа полинома (3.1) относительно q_1 , т.е. построение порождающего корневого годографа $RL(q_1)$, поскольку это позволит выявить траекторию движения полюсов порождаемого корневого годографа $RL(q_2)$ полинома (3.2).

Корневой годограф $RL(q_1)$ полинома (3.1) показан на рис. 1. Буквы p с нижними индексами обозначают полюсы системы. На положительной ветви годографа $RL(q_1)$ выберем, например, точку $a(-0.5, 5)$, которая соответствует значению параметра $q_1 = 25$.

Построим теперь порождаемый корневой годограф $RL(q_2)$ для полинома (3.2) относительно параметра q_2 . Очевидно, что при изменении параметра q_1 полюсы (начальные точки) порождаемого годографа $RL(q_2)$ перемещаются вдоль ветвей порождающего корневого годографа $RL(q_1)$. Корневой годограф $RL(q_2)$ показан на рис. 1. В точке $c(0, 5)$, где граница устойчивости системы пересекается положительными ветвями годографа

$RL(q_2)$ значение параметра годографа равно $q_2 = 25$. Полюс p_2 имеет координаты $\sigma = -0.5, \omega = 5, p_2(-0.5, 5)$.

На рис. 1 представлен совмещенный (расширенный) корневой годограф системы, $RL(q) = RL(q_1) + RL(q_2)$, на котором показано, что полюс p_2 годографа $RL(q_2)$ располагается в точке a на траектории его перемещения, которая представляет собой порождающий корневой годограф $RL(q_1)$.

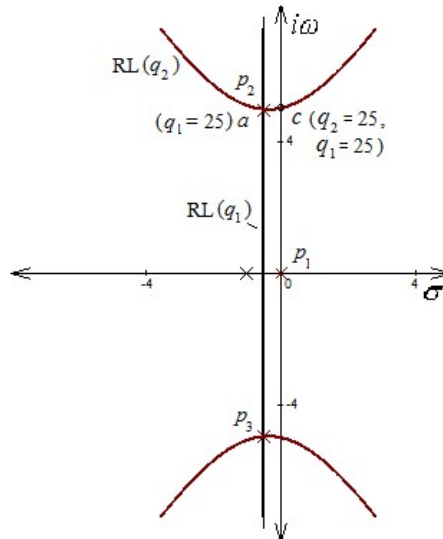


Рис. 1 – Расширенный корневой портрет $RL(q)$ системы, представленный совмещенным корневым годографом $RL(q) = RL(q_1) + RL(q_2)$: $RL(q_1)$ и $RL(q_2)$ совмещены

На основе приведенных выше положений очевидно, что в случае, когда q_1 и q_2 изменяются в пределах определенных интервалов значений, семейство полюсов свободного корневого годографа $RL(q_2)$ уравнения третьей степени (в нашем случае уравнения (2)) локализуется в левой полуплоскости на ветвях годографа $RL(q_1)$. В [2] также показано, что в пределах области, где семейство годографов интервальной системы третьего порядка пересекает границу устойчивости (на оси $i\omega$) значения свободного параметра q_2 возрастают пропорционально возрастанию значений координат ω . Поэтому, запишем достаточное условие устойчивости для рассматриваемой системы (2):

$$25 \leq q_1 < \infty, \quad (4)$$

$$0 < q_2 < 25, \quad (5)$$

Таким образом, выполнен параметрический синтез устойчивой ИДС (условия (3) и (4)).

1. Поляк Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
2. Nesenchuk A.A. Superimposed Root Locus Portraits for Parametric Synthesis of Robust Control Systems / A.A. Nesenchuk [Electronic resource] // IEEE International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2024): Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2024), Sydney – Australia, July 25–27, 2024 / – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICECET61485.2024.10698439.

ПОРИСТОСТЬ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

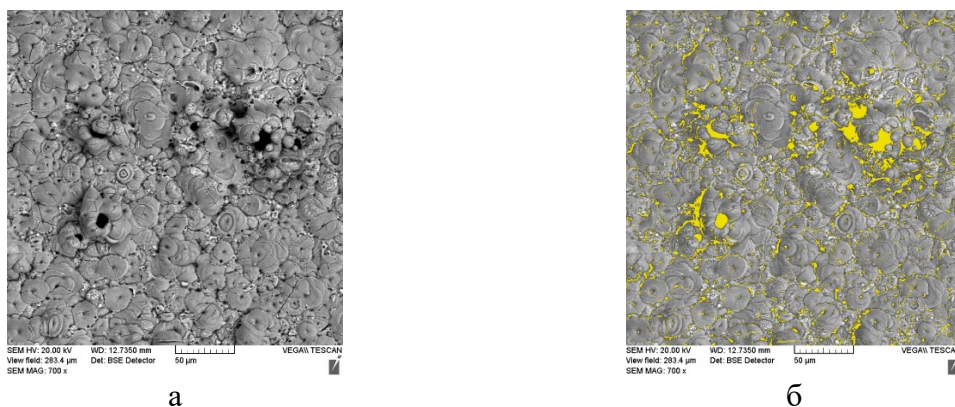
Нисс В.С., Королёв А.Ю., Паршута А.Э., Сорока Е.В.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Важной характеристикой МДО-покрытий является их пористость. Пористость покрытия оказывает существенное влияние на его электроизоляционные свойства, способность впитывать краску или смазку, способность к адгезии при соединении с другими материалами. Применительно к изделиям медицинского назначения из титана и титановых сплавов пористость покрытия определяет способность прорастания костной ткани при или, наоборот, способность изолировать поверхность от агрессивного воздействия биологических жидкостей.

В работе исследовалось влияние частоты и коэффициента заполнения импульсов на пористость оксидных покрытий, формируемых в процессе МДО. Исследования выполнялись при значениях частоты следования импульсов – 83, 125, 250, 333, 500 Гц и при значениях коэффициента заполнения положительного и отрицательного импульсов 0,05–0,45 (с интервалом 0,1). В качестве образцов использовались пластины из алюминия АД1 с размерами 20x5x1 мм. Обработка выполнялась в электролите на основе водного раствора КОН (3 г/л) с добавлением Na_2SiO_3 (9 г/л) при температуре 20 °С. Продолжительность обработки образцов составляла 60 мин. Выбор диапазонов амплитуды напряжения импульсов производился исходя из возможности получения равномерного бездефектного покрытия. Измерение пористости оксидного слоя производилось по снимку электронного микроскопа с помощью программы обработки изображений (рис. 1). Пористость определялась как процентное отношение суммы площадей пор на заданном участке площади снимка к общей площади участка. Для каждого образца оценивалась пористость поверхности и пористость основного внутреннего твердого слоя покрытия.

По результатам анализа полученных изображений установлено, что характеристики импульсов оказывают существенное влияние на рельеф и пористость формируемых оксидных слоев. При относительно длинных по сравнению с паузами импульсах формируется поверхность, заполненная большим количеством оплавленных гранул (с размерами 20–50 мкм) с пустотами между ними. При использовании относительно коротких по сравнению с паузами импульсов тока формируется менее пористое и плотное покрытие, представляющее собой наложение множества оплавленных участков (с размерами 10–30 мкм), образованных вокруг мест пробоя.



а – фотография оксидного слоя; б – выделенные участки пустот на оксидном слое
 Рис. 1 – Фотография поверхности оксидного слоя на алюминии АД1 при частоте следования импульсов 250 Гц и коэффициенте заполнения 0,05

Зависимости пористости оксидного покрытия от параметров импульсов представлены на рис. 2. Пористость поверхности снижается с увеличением частоты и с уменьшением коэффициента заполнения. В свою очередь, частота и коэффициент заполнения определяются, в том числе, длительностью импульсов. Таким образом, эффективное управление пористостью можно обеспечить изменением длительности импульсов при постоянной частоте и изменением частоты импульсов при постоянном коэффициенте заполнения. Амплитуда напряжения импульсов при этом остаётся постоянной. Исследования поперечных шлифов оксидированного слоя показали, что пористость основного внутреннего твердого слоя покрытия также изменяется в зависимости от частоты, но величина и диапазон ее изменения меньше – 6–9%. В таком же диапазоне пористость находится и при изменении коэффициента заполнения импульсов на одной частоте. Для пористости основного внутреннего твердого слоя покрытия существует точка перегиба (при частоте 250 Гц). При увеличении частоты выше этого значения пористость снижается с 8–9 % до 6 %. При изменении коэффициента заполнения импульсов происходит снижение пористости с увеличением коэффициента заполнения более 0,55 – с 8–9 % до 6–7 %.

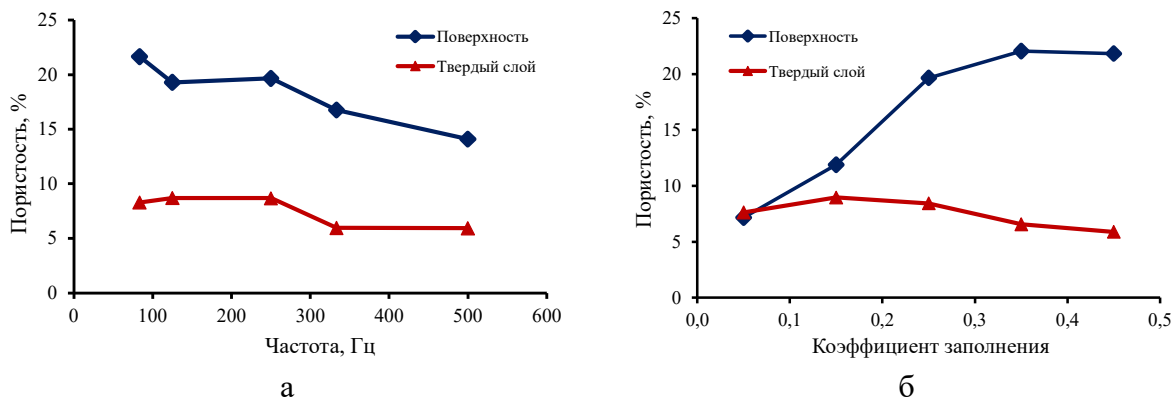


Рис. 2. Влияние частоты (а) и коэффициента заполнения (б) импульсов на пористость поверхности и твердого слоя покрытия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПРИ УЧЕТЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Нитиевский С.А.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

При моделировании динамических процессов различных типов электроприводов обязательным условием является учет ограничений, налагаемых на работу электропривода, источники которых могут быть весьма различны [1]. Одним из ярких примеров проявления таких ограничений является тяговая характеристика локомотивной тяги на примере локомотива ЭП20.

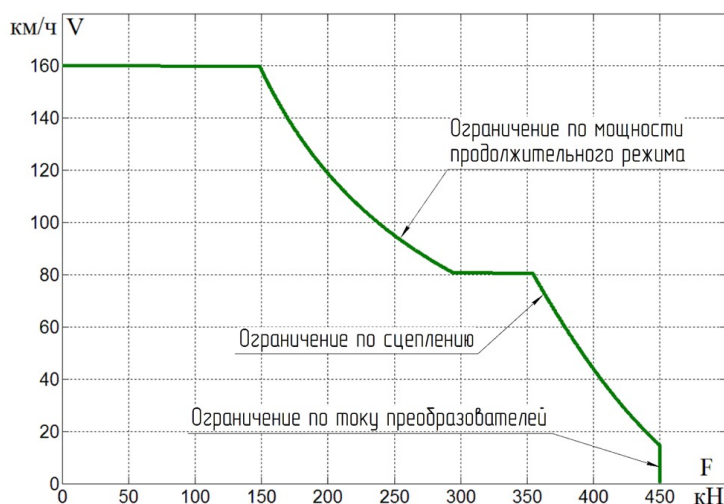


Рисунок 1 – Пример тяговой характеристики локомотива

Как видно из рисунка, сила тяги локомотива ограничивается как физическими (ограничение по сцеплению), так и техническими (перегрузочная способность преобразователей, мощность длительного режима) аспектами, каждый из которых необходимо учесть при моделировании электропривода. Следует отметить, что ограничение по сцеплению в основном характерно для локомотивной тяги, где есть необходимость реализации больших усилий трогания при сравнительно малом сцепном весе. Для моторвагонного подвижного состава данная проблема обычно является менее насущной.

Указанные выше ограничения в процессе моделирования могут быть учтены по-разному. Так, ограничение по пусковому току сравнительно легко реализуется путем задания соответствующего коэффициента обратной связи по оси Y , а ограничение по мощности длительного режима – путем введения соответствующего блока ограничения в канал управления составляющей тока по оси Y . Наиболее же трудоемким является учет коэффициента сцепления, что требует проведения

соответствующих расчетов в процессе моделирования. Пример реализации подсистемы расчета коэффициента сцепления для локомотива ЭП20 в среде MATLAB-Simulink показан на рисунке 2, где коэффициенты 0.28, 50, 4 и 0.0006 являются эмпирическими и приводятся в Правилах тяговых расчетов[2]. График момента тягового двигателя при разгоне до максимальной скорости с учетом реализованных ограничений приведен на рисунке 3.

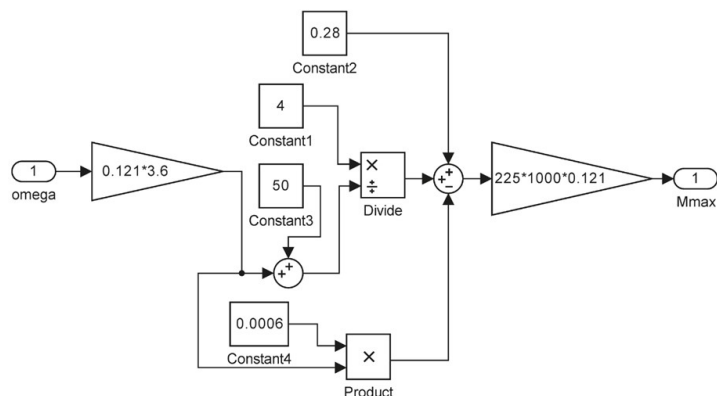


Рисунок 2 – Подсистема определения коэффициента сцепления

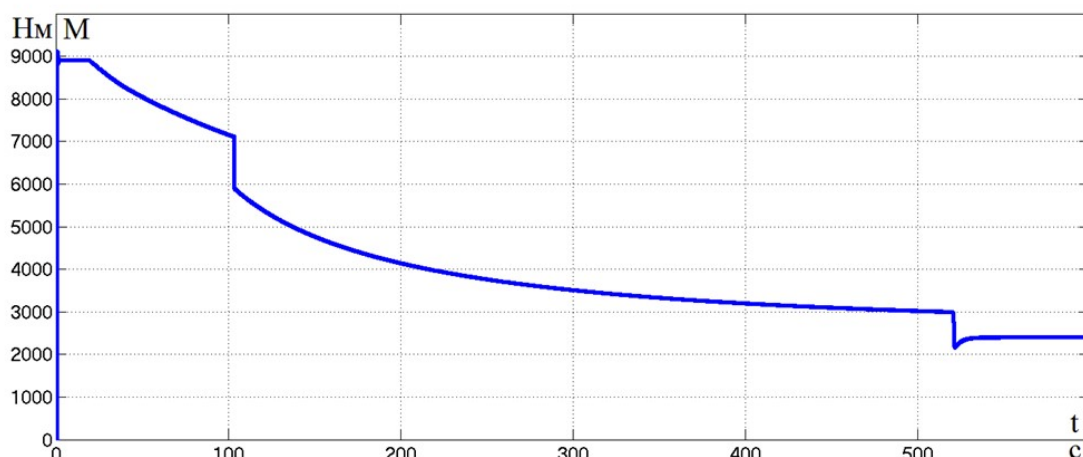


Рисунок 3 – График момента тягового двигателя с учетом ограничений

Анализ графика показывает, что форма кривой момента в целом соответствует форме тяговой характеристики, что говорит о том, что данные методы учета ограничений являются корректными и достаточными для общего анализа процессов, происходящих в тяговом электроприводе. При необходимости процесс исследования влияния различных типов ограничений может быть углублен путем разработки соответствующих методик моделирования.

1. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов // Ю. А. Бахвалов [и др.]; под ред. А. А. Зарифьяна. - М. : Маршрут, 2006. - 374 с.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Министерство транспорта Российской Федерации, 2016 г. – 515 с.

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ОБЛАСТЕЙ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДЕЙКСТРЫ

Огородник И.В.¹, Полозков Ю.В.¹,
Кункевич Д.П.¹, Полозков А.Ю.²

- 1) Белорусский национальный технический университет
- 2) УО «Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники»
Минск, Республика Беларусь

В процессе проектирования легковесных деталей возникает проблема декомпозиции областей интеграции ячеистых структур. Эти области представляют собой совокупности конечных элементов сеточной модели детали (рисунок 1 а), в которых действуют нагрузки, не превышающие некоторых, заранее заданных значений. Проведение декомпозиции областей сеточной модели обусловлено необходимостью их унификации с целью определения наиболее подходящей геометрической конфигурации ячеистой структуры для последующего удаления материала. Унификация заключается в приведении областей интеграции к форме параллелепипеда. Учитывая, что конечные элементы, составляющие области интеграции, имеют форму тетраэдров, основным требованием, ставится достижение максимальной заполненности ограничивающего подобласть параллелепипеда (*Boxiness*). Данный параметр для группы конечных элементов вычисляется как отношение суммы их объемов к объему ограничивающего параллелепипеда:

$$\text{Boxiness} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{Ti}}{V_{BB}}$$

где V_{Ti} – объем i -того элемента группы; V_{BB} – объем минимального ограничивающего параллелепипеда области.

Алгоритм декомпозиции областей включает следующие основные шаги (рисунок 1): шаг 1 – преобразование области конечных элементов сеточной модели (рисунок 1 а) в неориентированный граф (рисунок 1 б). Шаг 2 – создание списка весов вершин графа с нулевыми значениями. На шаге 3 для каждой вершины графа выполняется два действия: 3.1 – при помощи алгоритма Дейкстры находятся кратчайшие пути до всех вершин, и 3.2 – вес достижимых вершин увеличивается на количество её вхождений в кратчайшие пути. Вершина с наибольшим весом показана на рисунке 1 в. Далее на шаге 4 удаляются вершины с наибольшим весом и все инцидентные ей ребра. Шаг 5 заключается в повторении шагов 2 – 4 до увеличения количества несвязных подграфов. В процессе выполнения шага 6 полученные подграфы преобразуются в списки элементов, каждый из которых представляет собой отдельные подобласти исходной области конечных элементов. На шаге 7 элементы, не вошедшие ни в одну из

групп, присоединяются к одной из существующих, образуют новую или исключаются из дальнейшей обработки.

Для выполнения первого шага алгоритма вершины конечных элементов рассматриваемой области принимаются за вершины графа, а грани – за ребра. Смежные вершины (ребра) разных элементов принимаются за одну вершину (ребро) графа. Объем и минимальный ограничивающий параллелепипед для графов, построенных на основе модели, вычисляются только из тех элементов области, все вершины которых входят в выбранный подграф.

На практике описанный алгоритм может применяться многократно для декомпозиции исходной области. При этом следует использовать критерий сходимости, например заполняемость, и выполнять алгоритм на тех подграфах, для которых данный критерий не выполняется. Результаты двукратного выполнения алгоритма на данном графе показаны на рисунке 1 г.

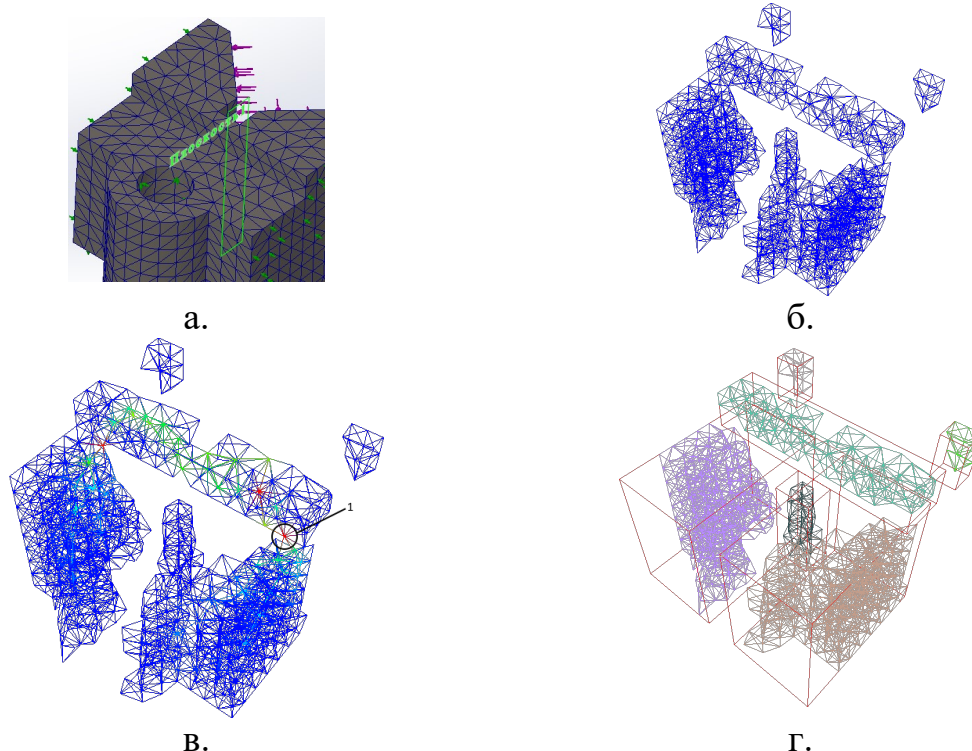


Рисунок 1 – Декомпозиция областей конечных элементов на примере сеточной модели зажимной губки приспособления

Представленный алгоритм показал лучшие результаты по сравнению с декомпозицией конечных элементов на основе алгоритмов кластеризации DBSCAN и Ланса-Уильямса, рассмотренной авторами [1].

1. Ковалева И.Л. Кластеризация подобластей для интеграции ячеистых структур в монолитные детали / И.Л. Ковалева, Д.В. Маканов, Ю.В. Полозков // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы XI международной научно-практической конференции, 5 апреля 2023 г. / Минск: Бизнесофсет ; ред. кол.: Околов А.Р., (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 64 – 65.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Опейко О.Ф.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Управление в системах промышленной автоматике формируется на основе информационных технологий с применением микроконтроллеров и программируемых логических контроллеров (ПЛК). Наиболее применимыми в системах промышленной автоматике являются пропорционально-интегро-дифференцирующие (ПИД) регуляторы в различных модификациях [1], [2], а возможность их совершенствования значительно расширилась в условиях информационных технологий. Это подтверждается опубликованными результатами исследований. В частности, в работе [2] предложен метод адаптации ПИД-регулятора со структурой искусственного нейрона. Поэтому развитие методов анализа и синтеза адаптивного управления [2], [3] является актуальным.

Для адаптации методом скоростного градиента [3] в системе с ПИД-регулятором (рисунок 1) применяется минимизируемый критерий качества

$$Q(t) = \int_0^t (u^2 + \lambda i^2) dt \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь u – сигнал управления, λ – коэффициент. В процессе адаптации используются сигналы выходной величины y и ошибки $y^* - y$ регулирования, где y^* – сигнал задания.

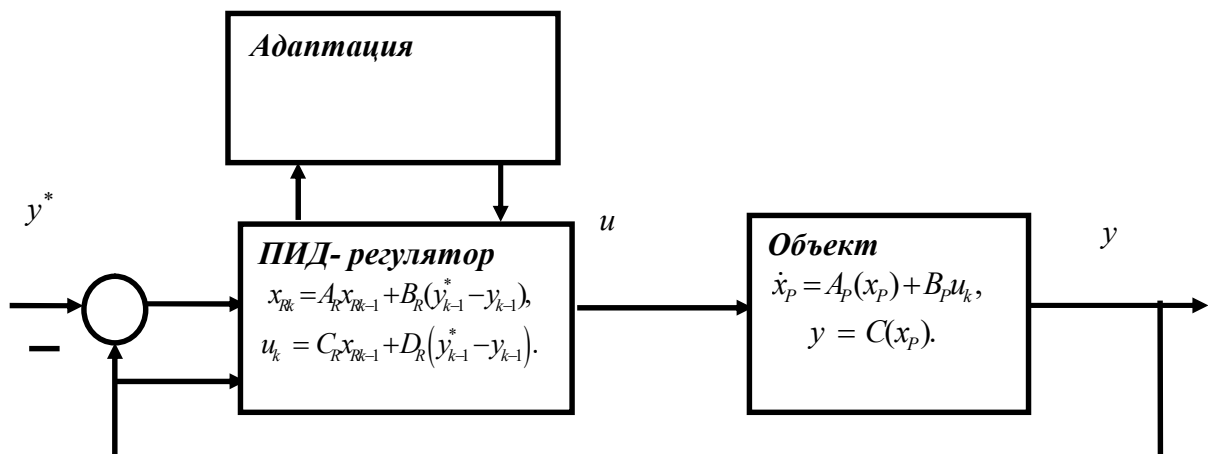


Рисунок. 1- Структура системы управления

На рисунке 2 представлен пример процессов в системе с ПИД-регулятором, где объект описывается линейными дифференциальными уравнениями 3 порядка.

При расчетных параметрах объекта адаптивный и неадаптивный ПИД-регуляторы дают результат, показанный на рисунке 2, а. То же получается в системе с адаптацией при значительном изменении параметров объекта.

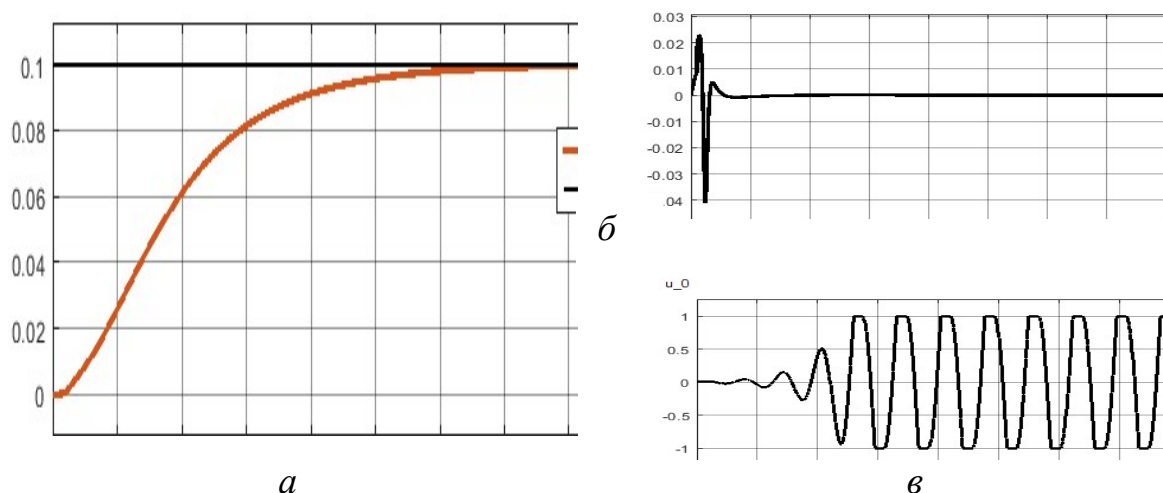


Рисунок 2 – Выходная величина y в системе (а), сигнал управления u с адаптацией (б) и без адаптации (в)

Сигнал управления адаптивного ПИД- регулятора показан на рисунке 2, б. В этом случае система без адаптации неустойчива, что видно на графике сигнала управления неадаптивного ПИД- регулятора на рисунке 2, в.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что применение адаптации методом скоростного градиента [3] по критерию (1) в системе с ПИД- регулятором позволяет значительно расширить область качества системы в пространстве изменяющихся параметров объекта.

1. K. J. Astrom and T. Hagglund, Advanced PID Control. / - Nord Carolina: ISA, 2006.– 461 p.
2. T. Pajchrowski, K. Zawirski and K. Nowopolski Neural Speed Controller Trained Online by Means of Modified RPROP Algorithm / IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, NO. 2, april 2015. P. 560- 568. DOI 10.1109/TII.2014.2359620.
3. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука. 1990.

АНАЛИЗ МАНЕВРЕННОСТИ МЕКАНУМ-КОЛЕС МОБИЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО РОБОТА

Павлюковец С.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Современное наукоемкое производство в последнее время подталкивает к разработке интеллектуальных мобильных роботов. Спрос на радиоуправляемые или автономные колесные мобильные роботы постоянно растет, так как роботы могут выполнять задачи в сложных и агрессивных рабочих средах [1]. Наиболее интересной с точки зрения конструкции платформы является использование меканум-колес, что позволяет реализовывать всенаправленное движение на плоскости только за счет согласования направления и скорости вращения колёс без изменения угла поворота корпуса. По этой причине изучение мобильных роботов на меканум-колёсах актуальной научной задачей.

Целью настоящей статьи является исследование влияния всевозможных топологических вариантов компоновки меканум-колёс четырёхколесного мобильного робота на его динамику.

Для описания подвижность и манёвренность робота, а также удовлетворения условиям реализации всенаправленного движения использовалась инверсная кинематическая модель [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ – производные от угла поворота 1, 2, 3, 4 колеса соответственно; M – матрица Якоби инверсной кинематики пространства состояний; \dot{x} – производная от координаты робота по оси x ; \dot{y} – производная от координаты робота по оси y ; $\dot{\theta}$ – производная от угла поворота центра масс робота.

Матрица Якоби пространства состояний M имеет размерность 3×4 :

$$M = -\frac{1}{r} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_1} & \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_1} & b - \frac{a}{\sin \gamma_1} \\ \cos \gamma_1 & \sin \gamma_1 & \operatorname{tg} \gamma_1 \\ \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_2} & \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_2} & -b - \frac{a}{\sin \gamma_2} \\ \cos \gamma_2 & \sin \gamma_2 & \operatorname{tg} \gamma_2 \\ \frac{\sin \gamma_3}{\sin \gamma_3} & \frac{\sin \gamma_3}{\sin \gamma_3} & -b + \frac{a}{\sin \gamma_3} \\ \cos \gamma_3 & \sin \gamma_3 & \operatorname{tg} \gamma_3 \\ \frac{\sin \gamma_4}{\sin \gamma_4} & \frac{\sin \gamma_4}{\sin \gamma_4} & b + \frac{a}{\sin \gamma_4} \\ \cos \gamma_4 & \sin \gamma_4 & \operatorname{tg} \gamma_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где r – радиус колеса; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – углы наклона ролика относительно оси вращения 1, 2, 3, 4 колеса соответственно; a – расстояние от оси вращения колеса до точки половины длины робота; b – расстояние от оси вращения колеса до точки половины ширины робота.

В работе было изучено 16 пространственных топологий меканум-колёс на основе оценки всенаправленной подвижности по рангу матрицы Якоби инверсной кинематики.

Согласно исследованию [3] топология может обеспечить всенаправленность движения, если матрица Якоби является полноранговой и оси направления наклона роликов колёс пересекаются минимум в двух точках.

Маневрирование мобильного робота с различными топологиями меканум-колёс проводилось по траектории лемнискаты.

Проведя оценку управляемости мобильного робота на основе сравнительного анализа данных можно утверждать, что по совокупности факторов, включающих динамические и кинематические показатели маневрирования, наилучшими топологиями размещения меканум-колёс в четырёхколёсном роботе являются симметричные топологии а матрицы их состояний – полноранговыми, показавшие наименьшие среди всех проведённых экспериментов ошибки позиционирования, угол отклонения корпуса робота относительно начала координат и рассогласование угловой скорости вращения колёс.

Остальные 14 симметричных и асимметричных топологий продемонстрировали низкие динамические показатели маневрирования, высокие рассогласования параметров, что привело к худшей управляемости и могут иметь ограниченное распространение, например, в случаях, когда преобладает однонаправленное движение по траектории, а не реализуется всенаправленное движение мобильного робота.

1. Li Y., Dai S., Zhao L., Yan X., Shi Y. Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot // *Symmetry*. 2019. Vol. 11(10):1268. DOI: 10.3390/sym11101268.
2. Радкевич А.А., У С., Вельченко А.А., Павлюковец С.А. Математическая модель движения мобильного робота с колесами всенаправленного типа // *Доклады БГУИР*. 2024. Т. 22. № 1. С. 82–90. DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-82-90.
3. Радкевич А.А., Павлюковец С.А. Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D параметрической имитационной модели // *Наука и техника*. 2024. Т. 23. № 5. С. 359–369. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-5-359-369.

ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Радкевич А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь.

Для того, чтобы мобильный робот мог совершать автономное планирование траектории, необходимо, чтобы он выполнял локальное избегание препятствий в соответствии с размером препятствий, осуществлял локальное позиционирование в соответствии с показаниями своих датчиков и совершал планирование траектории обхода препятствий на основании определённых алгоритмов [1].

В недетерминированных средах с препятствиями управление движением роботов связано с несколькими проблемами. Среди них ключевым вопросом является восприятие окружающей среды. Роботы должны своевременно распознавать препятствия, рельеф и другие объекты в окружающей среде, а также проводить фильтрацию, калибровку и обработку сигналов для получения надёжных сведений. Ещё одним значимым вопросом является метод планирования маршрута. Из-за неопределённостей и динамического изменения окружающей среды планирование пути должно быть адаптивным и гибким, а стратегия пути и управления должна быть скорректирована в любое время. Кроме того, управление движением робота должно учитывать неопределённость и динамическую изменчивость окружающей среды, чтобы избежать столкновений или задержек в препятствиях. Наконец, робот должен определять своё собственное положение и ориентацию в реальном времени и строить карту окружающей среды для навигации и планирования пути. В недетерминированной среде позиционирование робота и построение карт местности нарушаются шумом и ошибками, поэтому для повышения точности позиционирования и качества построения карты требуются интеллектуальные алгоритмы локализации.

Планирование пути делится на глобальное планирование пути и локальное планирование пути. Датчик расстояния, установленный на мобильном роботе, собирает данные внешней среды в облака точек и формирует высокоточную статическую карту глобальной среды с помощью алгоритма *GMapping* в операционной системе робота *ROS (Robot Operation System)*. Построение карты глобальной среды является необходимым условием для осуществления навигации мобильного робота. Когда построена карта мобильного робота, его координаты локализованы на карте и задана целевая точка пути, тогда минимальное расстояние от начальной точки до целевой точки является оптимальным глобальным маршрутом мобильного робота [2].

Традиционные алгоритмы построения маршрута в глобальной среде, такие как метод визуальной карты, метод сетки, метод свободного пространства, метод топологии и метод искусственного потенциального поля просты в реализации, однако если среда, в которой находится робот, сложна и динамична, разнообразие препятствий будет сильно влиять на время поиска маршрута и иметь недостаточный эффект для неизвестных или частично неизвестных сред. Поэтому интеллектуальные методы избегания препятствий позволяют роботу автономно получать оптимальную траекторию без столкновений с препятствиями. Существуют в основном методы избегания препятствий роботом, основанные на алгоритме нейронной сети, метод избегания препятствий на основе генетического алгоритма, метод избегания препятствий роботом, основанный на нечеткой логике, и метод избегания препятствий роботом, основанный на гибридном алгоритме [3].

Метод избегания препятствий роботом на основе нейросетевого алгоритма планирования глобальной навигации заключается в использовании обучающей и самоадаптивной функций нейронной сети и способности нейронной сети обрабатывать собранные данные. Даже когда траектория движения и форма препятствия изменяются, метод может обеспечить оптимальную траекторию обхода препятствий роботом. Благодаря получению информации о расстоянии до препятствий с датчика и моделированию внутренней нейронной сети можно реализовать планирование обхода препятствий в недетерминированных средах. С развитием вычислительных мощностей всё большее распространение в робототехнике получают нейронные сети Хопфилда, рекуррентные нейронные сети, нейронные сети прямого и обратного распространения ошибки (*BP*) и нейронные сети радиально-базисных функций (*RBF*).

1. Ян, Шисинь. Обзор методов планирования пути для мобильных роботов / Шисинь Ян, С. А. Павлюковец // 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. 163-164.
2. Павлюковец, С. А. К вопросу управления мобильным роботом с колесами всенаправленного типа. / С. А. Павлюковец, А. А. Вельченко, У Синьсинь, А. А. Радкевич, Н. О. Савко // BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции, Минск, 17–18 мая 2023 г. : в 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2023. – С. 94–102.
3. Szeremeta, M. Neural Tracking Control of a Four-Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels / M. Szeremeta, M. Szuster [J] // Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 11. – С. 5322-5322.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ ВЕНТИЛЬНЫХ АКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Радкевич А.А., Буйвид А.П.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь.

Вентильные электродвигатели с аксиальным магнитным потоком являются двигателями постоянного тока и состоят из двух стандартных для всех электродвигателей частей: неподвижного статора и подвижного ротора. К ротору прикреплены постоянные магниты, а статор содержит катушки, являющиеся электромагнитами, на которые подаётся напряжение. Вентильные аксиальные электродвигатели характеризуются сложной системой управления, которая с помощью полупроводниковых элементов, обычно транзисторов (выполняющих функцию вентилей, от которых и произошло название типа двигателя), подаёт напряжение на определенную катушку и создает магнитное поле.

Магнитное поле, относительно которого ориентированы магниты ротора, создаёт крутящий момент на валу двигателя. Некоторые применения двигателей требуют плавности вращения ротора, например, при сканировании и метрологии.

Аксиальные электродвигатели с пазами статора из-за особенности конструкции в виде пазов (зубцов) с обмоткой показывают неравномерный крутящий момент. Это происходит за счет взаимодействия постоянных магнитов и пазов между зубцами статора, что приводит к пульсациям крутящего момента и, соответственно, неравномерности крутящего момента на валу двигателя. Чтобы компенсировать этот недостаток используют статор без пазов [1].

Отличительной особенностью электродвигателей с аксиальным магнитным потоком является разнообразие их конструкций. Существует достаточно много вариантов компоновок электродвигателей, которые различаются пространственным взаимным расположением основных узлов (статора и ротора):

Односторонние аксиальные вентильные электродвигатели.

Со статором с пазами.

Со статором без пазов.

С явнополюсным статором.

Двухсторонние аксиальные вентильные электродвигатели

С внутренним статором.

Со статором с пазами.

Со статором без пазов.

С железным магнитопроводом статора.

Без железного магнитопровода статора.

Без магнитопровода ротора и статора.

С явнополюсным статором.

Со статором с пазами.

Со статором без пазов.

С явнополюсным статором.

Пространственные варианты компоновки вентильных аксиальных электродвигателей представлены на рис. 1. [1]

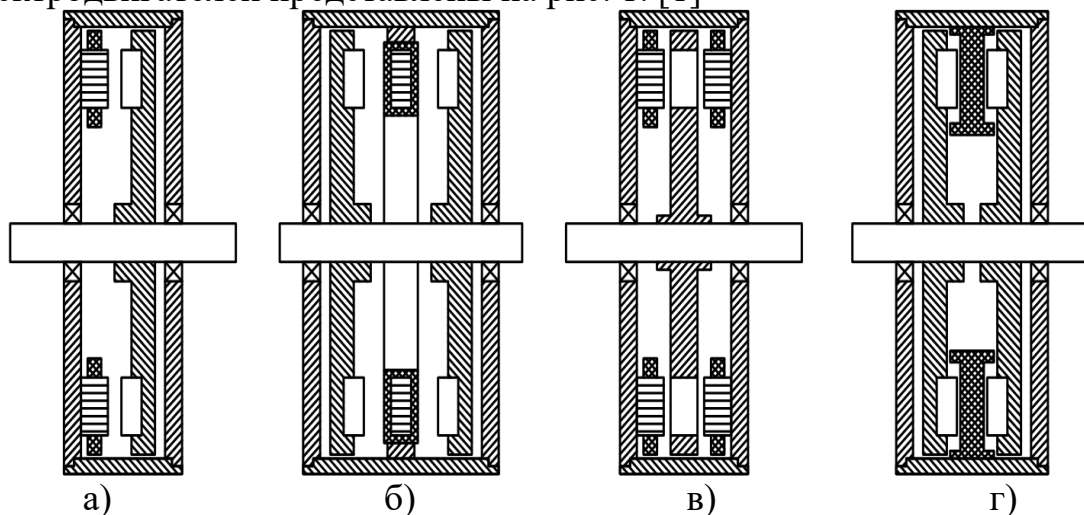


Рис. 1. Варианты пространственной компоновки основных узлов аксиальных вентильных электродвигателей: а) с одним ротором и одним статором; б) с двумя роторами и одним статором; в) с двумя статорами и одним ротором; г) со статором без магнитопровода

Для каждого пространственного варианта компоновки вентильных аксиальных электродвигателей существуют параметры, которые характеризуют его энергетическую эффективность.

По сравнению с традиционными радиальными электродвигателями, аксиальные электродвигатели имеют более высокое соотношение крутящего момента к массе и удельную мощность, что приводит к использованию меньшего количества материала и более высокому КПД. Кроме того, аксиальные электродвигатели с различными вариантами их компоновки имеют плоские и легко регулируемые воздушные зазоры и могут быть спроектированы так, чтобы создавать меньший шум и меньшую вибрацию. В дополнение к этому, аксиальные электродвигатели имеют меньшие габариты, чем радиальные, что является важным свойством для их использования в мобильных устройствах.

1. Буйвид, А. П. Конструктивные особенности расположения силовых узлов вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком / А. П. Буйвид, М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич / Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2024 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С 157-159.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭШЕЛОНИРОВАНИЕМ ПОЛЕТОВ

Санникович И.А., Околов А.Р

Белорусский национальный технический университет,
г.Минск, Республика Беларусь

Эшелонирование – это общий термин, означающий вертикальное и горизонтальное рассредоточение воздушных судов (ВС) в воздушном пространстве на установленные интервалы.

Нарушение норм эшелонирования может происходить в связи с техническими неисправностями, метеорологическими условиями, человеческим фактором и другими причинами. Полностью устранить ошибки в работе систем управления полетом невозможно, так как любое оборудование, как бортовое (пилотажно-навигационный комплекс), так и наземное (радиолокационное оборудование) имеет погрешности при измерении тех или иных параметров, которые определяют местоположение ВС в пространстве.

Для того чтобы минимизировать риски столкновений, а также для повышения эффективности использования воздушного пространства, в настоящее время разрабатываются и вводятся системы управления автоматического наблюдения и навигации. Воспользовавшись информацией, полученной с крупнейшего источника данных о полетах ADS-B Exchange, можно сделать вывод о том, что наиболее распространенными на Европейском континенте системами для определения местоположения воздушных судов являются MLAT (Multilateration) и ADS-B (Automatic dependent surveillance-broadcast). Система автоматического зависимого наблюдения-вещания ADS-B является более новой по сравнению с MLAT, так как она применяет современные технологии для более точного позиционирования, такие как использование GPS.

ADS-B – система, которая позволяет летчикам, а также авиадиспетчерам на наземном пункте наблюдать движение воздушных судов с большей точностью, чем это было доступно ранее, и получать аэронавигационную информацию. Преимущества данной системы:

- Повышенная точность и надежность. Данная система использует GPS/ГЛОНАСС для определения местоположения судна, что помогает обеспечивать более высокую точность по сравнению с классическими радарными;

- Улучшенная ситуационная осведомленность. Пилоты и диспетчеры получают информацию о местоположении других воздушных судов, что существенно улучшает понимание ситуации в воздухе в данный момент времени;

- Расширение зоны покрытия. В связи с тем, что ADS-B использует системы позиционирования, она может работать в труднодоступных и удаленных местах, где классические радарные системы могут быть не столь эффективны.

Данная система имеет также несколько существенных недостатков, а именно:

- Уязвимость к киберугрозам, т.к. протокол не использует никаких средств защиты при передаче данных;

- Зависимость от спутниковых систем навигации.

Для устранения вышеперечисленных недостатков, может быть использовано следующее:

- Улучшение безопасности при передаче данных. В систему передачи данных могут быть внедрены механизмы шифрования и аутентификация. Это поможет защитить передаваемую информацию от преднамеренного изменения или перехвата;

- Расширение зоны покрытия. Установка дополнительных наземных станций будет расширять зону покрытия;

- Разработка новых стандартов. Создание стандартов для обмена данными между самолетами и наземными станциями может обеспечить более полное представление о ситуации в воздухе.

Тенденции развития системы автоматизации воздушного движения ADS-B:

- Интеграция с новыми технологиями. Внедрение новых технологий, таких как искусственный интеллект и машинное обучение позволит повысить скорость принятия решений, рационализировать маршруты полетов, а также улучшить прогнозирование погоды и других метеорологических факторов;

- Разработка систем беспилотных летательных аппаратов. Беспилотные летательные аппараты применяются в различных сферах деятельности, начиная от выполнения гражданских целей и заканчивая военными. Их интеграция в систему ADS-B позволит повысить безопасность и эффективность управления воздушным движением;

- Повышение уровня автоматизации. Внедрение автоматизированных систем управления воздушным движением исходя из данных ADS-B для повышения эффективности работы диспетчерских станций и уменьшения влияния на их работу человеческого фактора.

- Развитие спутниковых систем. При развитии и увеличении количества спутниковых систем ADS-B, можно расширять зоны их покрытия, что предоставляет возможность использовать ADS-B даже в самых труднодоступных районах планеты.

По мере совершенствования систем автоматизации воздушного движения, они будут как оптимизировать нынешние процессы в авиационной отрасли, так и внедрять современные технологии для ее дальнейшего развития.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ

Сидорик В.В.¹

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Лабораторный практикум является одной из форм учебного процесса и предусматривается учебными планами (программами) при изучении различных учебных дисциплин. Выполнение любой лабораторной работы предполагает проведение натурального эксперимента на реальном оборудовании. Следующая фаза лабораторной работы состоит в обработке результатов натурального эксперимента и включает вычисления по формулам, построение графиков, анализ результатов и выводы.

Лабораторные работы, выполняемые в технических вузах и имеющие прикладную направленность, как правило, затрагивают достаточно сложные явления и процессы. По этой причине фаза обработки результатов и попытка не только качественного, но и количественного объяснения результатов не является простым. Для этого имеется достаточно много причин. Здесь и сложность самих явлений и процессов, большое количество факторов и параметров, влияющих на поведение реальных систем. Невозможность учесть все факторы при переходе от понимания реальных систем и их моделей требует проверки адекватности принятой для интерпретации модели. Сложность усугубляется и тем, что нет заранее заготовленных рецептов в пользу той или иной модели и ее обоснования. Сам выбор модели уже влияет на интерпретацию результатов.

В целом, это ставит вопрос о проверке адекватности модели при проведении натурального эксперимента. Это особенно важно в части прогноза поведения системы на основе используемой модели.

Таким образом, весьма актуальным при проведении натурального лабораторного эксперимента является соединение практической и теоретической части – реальной системы и ее модели.

Рассмотрим проведение натурального эксперимента, его теоретической модели и проверки адекватности на примере маятника Максвелла. Механическая конструкция лабораторной установки включает: основание с вертикальной колонкой, неподвижный верхний и подвижный нижний кронштейны. На верхнем кронштейне установлен узел фиксации маятника, фотоэлектрический датчик и вороток для крепления и регулирования длины нити подвеса маятника. На нижнем кронштейне также установлен фотоэлектрический датчик. Маятник представляет собой диск, закрепленный на оси и подвешенный бифилярным способом, т.е. с помощью двух нитей. Электронная схема состоит из секундомера, имеющего диапазон измерения в пределах 0-99.999с и погрешность

$\pm 0.02\%$, и двух фотоэлектрических датчиков. Измерение времени осуществляется по моментам открывания и прерывания светового потока диском маятника и генерированием электрических сигналов в цепи фотоэлектрических датчиков, соединенных с секундомером.

Переход от реальной установки к модели требует целого ряда допущений с точки зрения модели элементов маятника, физических полей и среды (воздух) (рис. 1). Например, маятник считаем недеформируемым, а нити подвеса однородными и упругими. Атмосферу принимаем как однородную вязкую несжимаемую среду.

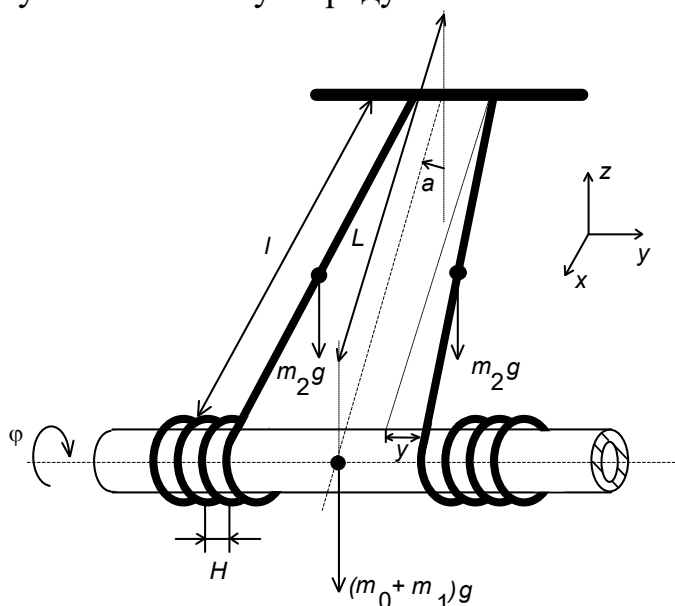


Рисунок – 2. Модель эксперимента (диск маятника не показан)

Для вывода математической модели учтем действие различных сил, влияющих на движение: силу тяжести, силу лобового сопротивления, подъемную силу, силу Архимеда и силы трения, возникающие при взаимодействии нитей подвеса с осью маятника. Вывод искомым уравнений довольно сложен. Результат представляет собой систему двух дифференциальных нелинейных уравнений второго порядка

$$A_1 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + B_1 \frac{d\alpha}{dt} \frac{d\varphi}{dt} = Q_\alpha$$

$$A_2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} - B_2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + C_2 \varphi = Q_\varphi$$

Коэффициенты этих уравнений в свою очередь представляют достаточно сложные математические выражения и здесь не приводятся. Решение этих уравнений позволяет определить адекватность выбранной модели и установить ключевые факторы, влияющие на движение маятника.

1. Сидорик В.В., Джилавдари И.З. Физика в компьютерных моделях: Учебно-методическое пособие. – Минск : ПИОН, 1998, с. 250

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Сидорик В.В.¹

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Теория колебаний является важной составной частью подготовки студентов технических вузов к будущей профессиональной деятельности. Колебательное движение относится к числу самых распространенных в естественной и искусственной средах. При этом реальные колебательные системы достаточно сложны и их изложение, как правило, ограничивается ресурсами учебного времени и оснащением учебных лабораторий по той или иной технической дисциплине. По этой причине в учебных задачах рассматриваются в большинстве случаев колебательные системы на базе гармонического осциллятора с одной степенью свободы.

Любое усложнение базовой модели гармонического осциллятора обуславливает существенные усложнения и приводит к нелинейным системам. Движение нелинейных систем описывается нелинейными уравнениями, а это еще более затрудняет решение, так как требует привлечение численных методов.

Компьютерные технологии безусловно позволяют преодолеть такого рода сложности. Тем не менее, и в этом не все так просто и гладко. На наш взгляд основные проблемы здесь возникают на нескольких этапах. Первый этап – постановка реальной задачи и упрощение ее переходом (выбором) соответствующей физической модели и ее обоснованием. Обоснование модели в ряде учебных изданий недостаточно полно раскрывает смысл тех приближений и допущений, которые необходимо сделать для того, чтобы обучаемые понимали суть делаемых допущений. Второй этап – запись уравнения движения для выбранной модели. Результатом является уравнение (системы уравнений). В большинстве случаев это дифференциальные уравнения высоких порядков. Порядок определяется количеством степеней свободы модели колебательной системы. На третьем этапе – алгоритмизация и программирование.

Отметим здесь следующее. Первый и второй этапы преподаватель реализует, опираясь на свои знания в профессиональной области. Для третьего этапа необходимы знания студентов математических пакетов и их применение в части решения уравнений. В какой-то степени это наличие определенной культуры в области информационных технологий. Наряду с этим, отметим, что современные студенты приходят в вуз уже имея определенные познания и навыки в области программирования. Для таких студентов реально, хотя и с определенными трудностями, привлечь знания из области языков программирования, например, Java и Python. Соответствующие библиотеки для решения таких задач имеются.

Еще одним привлекательным направлением применения таких задач является возможность их решения как курсовых работ и проектов, а также заданий лабораторного практикума. Сам факт решения реальных задач, а не упрощенных и идеализированных, вызывает у студентов дополнительные стимулы к их решению.

Покажем, как это может быть реализовано в случае простейшей модели, хорошо известной и изученной школьниками и студентами. Такой простейшей колебательной системой является математический маятник (рис. 1).

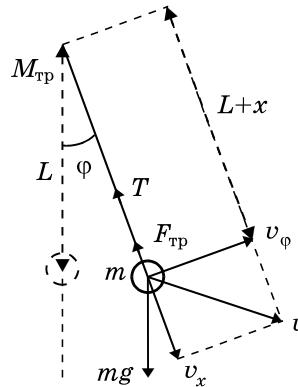


Рисунок 1 – Модель маятника и обозначения

В математическом маятнике стержень является невесомым и недеформируемым. Аналитическое решение такой задачи описано во всех учебниках по физике. Однако, стоит только изменить постановку задачи и считать стержень невесомым, но деформируемым, уравнение движение становится гораздо более сложным и, как показано в [1], имеет приобретает вид системы из двух дифференциальных уравнений 2-го порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{f}{m} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x - g \cos \varphi - L \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = 0,$$

$$(L+x) \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{2h}{mL} \frac{d\varphi}{dt} + L\Omega_0^2 \sin \varphi + 2 \frac{dx}{dt} \frac{d\varphi}{dt} = 0.$$

Решение такого уравнения позволяет не только визуализировать кинематику и динамику поведения такой системы, но и познакомиться на реальной задаче с особенностями нелинейных систем. Здесь можно выявить колебания маятника с различными начальными условиями, учесть влияние различных видов трения, рассмотреть малые и большие угловые колебания, вращательное движение, вычислить зависимости от времени угла поворота, угловой скорости, углового ускорения и силы натяжения.

1. Сидорик В.В., Джилавдари И.З. Физика в компьютерных моделях: Учебно-методическое пособие. – Минск : ПИОН, 1998, с. 250

СОБСТВЕННОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Тимошевич В.Б.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь;

В настоящее время широко ставится задача электромагнитной совместимости вновь разрабатываемых технологических процессов и объектов с медицинским оборудованием, радио- и телепередающей аппаратурой связи. Это достигается аналого-цифровым преобразованием и помехо-защищенным кодированием передаваемых сигналов. Однако, задача увеличения дальности, улучшения верности и защиты от помех передаваемого сигнала остается по-прежнему актуальной. Максимальный уровень излучаемых радиопомех технологического оборудования жестко нормируется в различных низко- и радиочастотных диапазонах и зависит от расстояния между объектами. Но создаваемое объектом либо процессом радиоизлучение несет информацию о параметрах и характеристиках самих объектах, режимах работы, физических процессах, их сопровождающих. Источником электромагнитного излучения (ЭМИ) процессов, объектов в радиочастотном диапазоне часто являются электрические разряды, паразитно сопровождающие процесс либо объект, например, разделение электрических зарядов с последующим их стеканием в результате трибоэлектричества : самолеты, вертолеты и БПЛА в полете, шерстяные и синтетические ткани при их производстве, разделение электрических зарядов угольными частицами и электрический разряд в двигателях внутреннего сгорания. В других случаях электрический разряд может выступать в качестве активного инструмента – это, например, травление электрическим разрядом, электросварка, электроимпульсное полирование коррозионно-стойких и прочих сталей, других металлов. В зависимости от процессов в радиочастотном излучении может изменяться один или несколько параметров: математическое ожидание, дисперсия в различных частотных диапазонах, флуктуационные характеристики, ЭМИ может быть модулировано по амплитуде, фазе и частоте, по изменению которых можно судить о состоянии объекта. Т.е нужно решить задачу подавления ЭМИ до заданного уровня, но не до нуля, чтобы, при необходимости, сохранить возможность контроля и диагностики процессов и объектов.

1. Здор Г.Н., Тимошевич В.Б., Северин И.Н. Механизмы возникновения собственного радиоизлучения (РИ) двигательных установок и способы регистрации РИ. – Минск: Материалы V МНТК «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении», 2017. – 2 с.

ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ НА СОРТОВОМ ПРОКАТЕ СТАЛИ 20Г2Р ПОСЛЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА

**Хина Б.Б.¹, Покровский А.И.¹, Глушаков А.Н.¹,
Сотов К.А.¹, Панковец И.А.²**

- 1) Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь
- 2) ОАО «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК»
Жлобин, Республика Беларусь

Введение. На ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (далее ОАО «БМЗ») производится сортовой прокат в бухтах из стали 20Г1РА (20Г2Р) по ГОСТ 10702 «Прокат сортовой из конструкционной нелегированной и легированной стали для холодной объемной штамповки. Общие технические условия», которая применяется для изготовления крепежных изделий (болты, гайки, шурупы-саморезы и др.). На заключительной стадии технологического процесса прутки (катанку) диаметром 6,5–16,5 мм подвергают сфероидизирующему отжигу в печах с защитной атмосферой для получения структуры зернистого перлита. При этом для существенной доли продукции (около 20 %) на отдельных участках поверхности прутка образуется слой с аномальной структурой, толщина которого превышает допустимую. В нем наблюдается существенный рост зерна феррита и пониженное содержание частиц глобулярного цементита по сравнению с сердцевиной. Такая структура подпадает под определение обезуглероженного слоя (ОБС) по ГОСТ 1763 «Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя». Поэтому актуальной задачей для ОАО «БМЗ» является модификация существующей технологии для получения структуры стали, которая должна удовлетворять ГОСТ 1763 и индивидуальным требованиям потребителей по толщине ОБС – не более 1,0 % от диаметра.

В связи с этим целью данной работы является изучение структуры ОБС на прокате стали 20Г2Р для последующей оценки возможных причин его образования.

Методика исследований. Поскольку легкие элементы, такие как углерод, азот и бор, не определяются методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА), в данной работе использована оптическая микроскопия (прибор Микро 200 Vert, ООО Планар) и дюрометрия (микротвердомер ПМТ-3 фирмы ЛОМО). Глубину ОБС определяли в соответствии с ГОСТ 1763, а микротвердость – по ГОСТ 9450 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» при массе нагружающей гири 50 г (HV₅₀) и 100 г (HV₁₀₀).

В условиях ОАО «БМЗ» сфероидизирующий отжиг стали марки 20Г1РА (20Г2Р) проводили при 680 °С в течение 6 часов.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 показана микроструктура сердцевины и поверхности образца стали 20Г1РА (20Г2Р) после сфероидизирующего отжига. Видно, что после обработки зерна феррита (с черными точками цементита) в зоне ОБС значительно крупнее, чем в сердцевине.

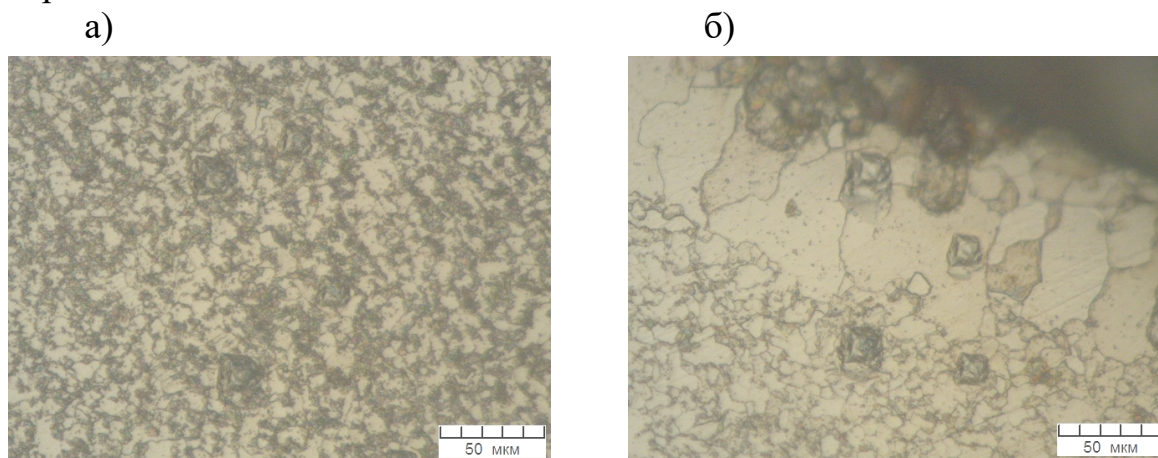


Рисунок 1 – Микроструктура стали (оптическая микроскопия):
а) середина образца (x500), б) край образца с ОБС (x500)

Дириометрический анализ показал (рис. 2), что микротвердость HV в середине ненамного отличается от ОБС: в сердцевине $HV_{50} = 24-27$ МПа, $HV_{100} = 26-32$ МПа, а на поверхности в зоне с аномальной (обезуглероженной) структурой $HV_{50} = 23-24$ МПа, $HV_{100} = 25-27$ МПа.

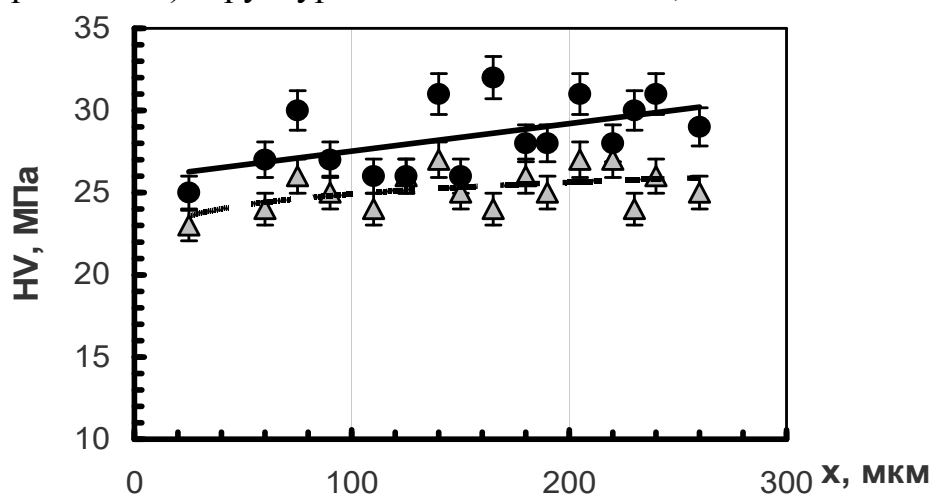


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости от расстояния от поверхности при нагрузке 50 г (▲ и пунктирная линия) и 100 г (● и сплошная линия)

Закключение. Вероятно, наблюдаемая микроструктура может быть обусловлена совместным действием двух факторов: обезуглероживанием, т.е. диффузией атомов углерода как вглубь к растущим частицам цементита, так и во внешнюю газообразную среду, и аномальной рекристаллизацией локальных участков поверхностного слоя из-за того, что отдельные зерна феррита, в которых имеется невысокие (так называемые околоритические) остаточные напряжения, быстро растут за счет соседних.

УДК 621

КОМПЛЕКСНАЯ МУЛЬТИМЕДИЙНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Юденков В. С

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Для получения модели движения машины в Simulink задавалась модель электродвигателя с системой управления. Для решения задачи управляемости и стабилизации движения блок VNPlantBlock из библиотеки VisualNastran[1] передавался в систему Simulink. В его свойствах указывался путь к предварительно созданной в VisualNastran механической модели машины. Для создания комплексной мультимедийной модели системы управления после моделирования механической части и системы управления необходимо их объединить, предварительно проведя подготовку моделей в пакетах VisualNastran и Simulink. В VisualNastran необходимо задать инструменты контроля параметров, которые будут использоваться электромеханической системой для решения задачи управления и стабилизации комплексной модели. Контролируются: момент сопротивления на приводном валу и угловая скорость вращения вала. Следующий шаг — объединение механической модели и модели системы стабилизации скорости. Блок VNPlantBlock (рисунок 1) из библиотеки VisualNastran внедряется в систему управления в Simulink.

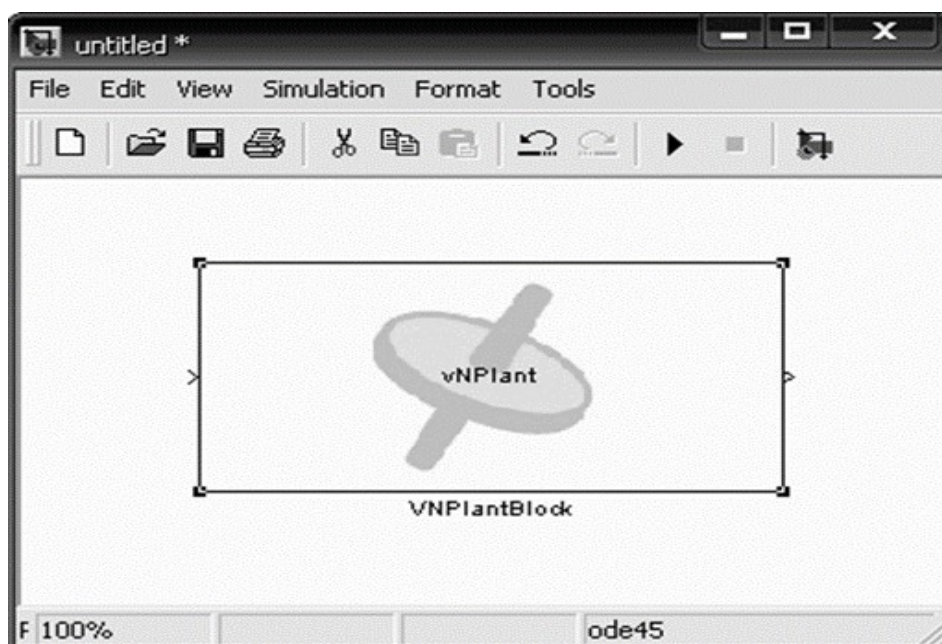


Рис.1. Окно блока VNPlantBlock

При запуске модели в VisualNastran загружается механическая модель, а в Simulink – модель системы управления. Далее программы работают по

очереди. Через блок VNPlantBlock считывается величина выходного параметра механической модели (угловая скорость вращения вала) и передается в Simulink, где на основании математической модели вычисляется значение входного параметра (момент на валу двигателя). Далее блок VNPlantBlock передает значение момента в VisualNastran, где и моделируется механизм с приложенным моментом в течение заданного шага по времени. Такой пошаговый обмен данными продолжается на всем временном отрезке моделирования системы (Рис 2.).

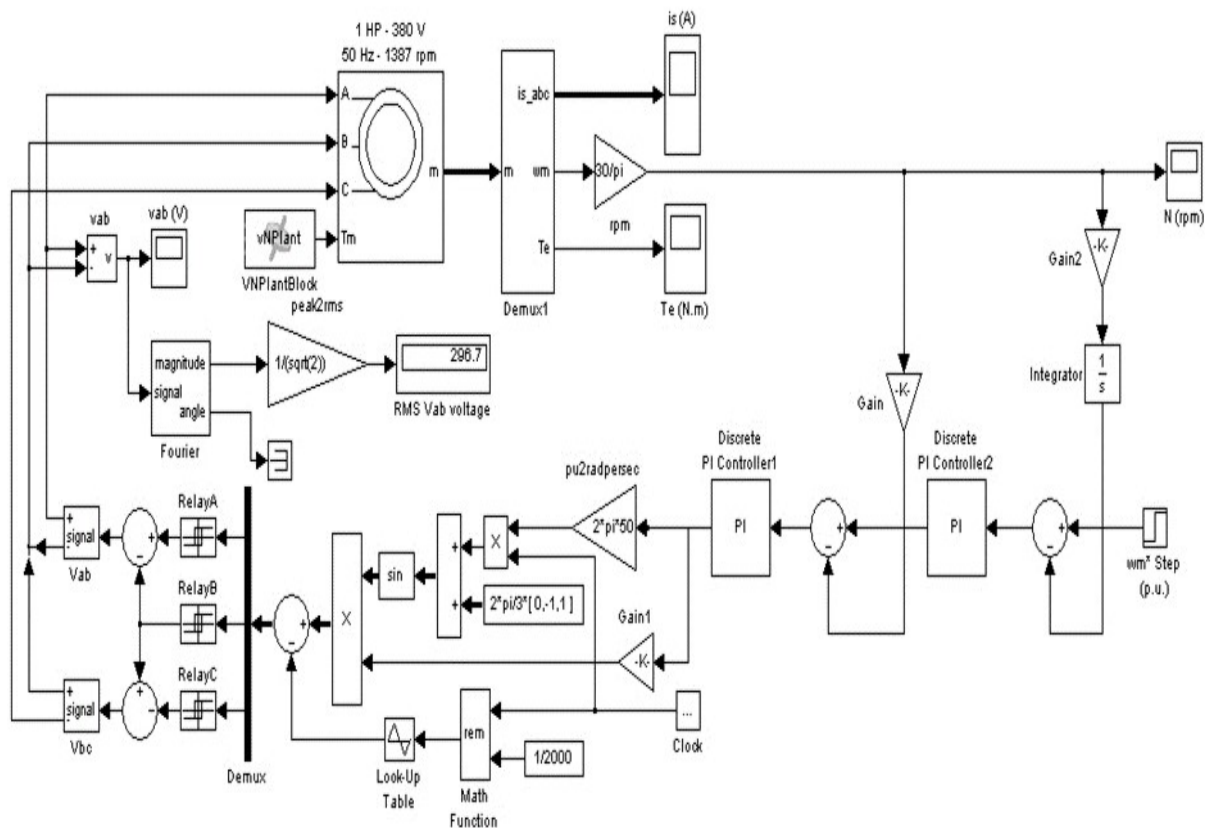


Рис. 2. Система управления с внедренным блоком VNPlant

Для правильной настройки параметров регулятора, с целью получения апериодического переходного процесса, воспользуемся блоком Signal Constraint, который автоматизирует процесс настройки ПИ-регуляторов.

С помощью пакета SolidWorks [2] была создана геометрия деталей и узлов моделируемой машины, которая экспортировалась в VisualNastran, где задавались связи узлов машины, и проводилась симуляция работы машины. Для решения задачи управляемости и стабилизации скорости вращения приводного вала машины в пакете Simulink была создана электромеханическая модель системы управления.

1. Рычков С.П. MSC visual NASTRAN для Windows. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.
2. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Ян Шисинь, У Синьсинь, Чаплыгин Д.Ю., Павлюковец С.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В исследовании технологий, связанных со всевозможными мобильными роботами, навигационная технология является ядром его исследований. Поэтому основной задачей при разработке автономных мобильных роботов является изучение и применение методов навигации, которые наиболее точно осуществляют построение карт и маршрута.

Общие методы навигации включают: инерциальную навигацию, магнитную навигацию, спутниковую навигацию, визуальную навигацию и лидарную навигацию.

Инерциальная навигация. Развитие инерциальной навигации прошло через несколько этапов, и до настоящего времени являлась основным методом в навигации. Инерциальная навигация использует декодеры, гироскопы и т.д. для прогнозирования следующей траектории мобильного робота. Этот метод навигации можно сравнить с процессом переноса Маркова, то есть текущее положение робота зависит только от предыдущего его положения. Однако это приводит к значительному накоплению ошибок и как следствие, навигационная задача не может быть выполнена в должной мере.

Магнитная навигация. Магнитная навигация связана с системой сбора сигналов робота, используя сигнал ориентира, сигнал столкновения, инфракрасный сигнал и т.д., которые после расчета и обработки контролируют в реальном времени приводную часть мобильного робота. По сравнению с другими методами навигации этот метод имеет такие значительные преимущества как: простота управления, экономия затрат и т.д. Однако имеются и недостатки, в основном связанные с повреждением магнитной полосы, что приводит к изменению пути и потере ориентации мобильным роботом.

Спутниковая навигация. Спутниковая навигация является одним из основных современных методов навигации. Суть ее заключается в измерении расстояния между текущим приемником робота и спутником, а затем используется интегрирование информации о расстоянии ряда спутников для расчета текущего точного местоположения робота. Для расчета долготы, широты и высоты мобильного робота на Земле требуется не менее 4 спутников. Преимуществом данного метода навигации заключается в универсальности и осуществимости глобального позиционирования, а недостатком является сбой позиционирования в помещении из-за препятствия правильному приему сигнала.

Визуальная навигация. В настоящее время метод визуальной навигации все больше и больше находит свое распространение при управлении, идентификации и определения местоположения мобильного робота в окружающей среде. Суть метода заключается в использовании камеры для сканирования окружающей среды и построения двухмерной или трехмерной ее карты.

Лидарная навигация. LiDAR (лидар) – это датчик с самой высокой точностью и самым быстрым откликом, который используют для определения статических и динамических объектов. На сегодняшний день, среди всего многообразия датчиков, лидары являются самыми дорогими. Однако прогресс не стоит на месте и постепенно их стоимость уменьшается. В настоящее время лидар в основном используется для построения 3D-реконструкции карты и обнаружения объектов в помещениях.

В этой статье разбираются текущие проблемы навигации мобильных роботов, кратко представлены современные методы навигации, позволяющие мобильным роботам строить топологию карт и описать модель окружающей среды. Подводя итог, можно сказать, что путь магнитной навигации относительно фиксирован и лишен гибкости; инерциальная навигация имеет большой разброс в значениях после долгого использования, что приводит к дрейфу мобильного робота; спутниковая навигация достаточно точна на открытой местности, но не может быть использована в помещениях; визуальная навигация требует слишком много вычислений для распознавания образов; а лидарная навигация меньше подвержена влиянию факторов окружающей среды и имеет хорошие навигационные характеристики. Поэтому для реализации навигационной системы мобильных роботов в различных средах следует использовать лидарную навигацию в совокупности с визуальной или спутниковой.

1. Zhong Min. Research on autonomous navigation of mobile robot based on fusion of vision and lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
2. Guivant J, Nebot E. Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation[C]. International Conference on Robotics and Automation, 2001, 17(3):242- 257.
3. Luo Yuan, Su Qin, Zhang Yi, et al. Simultaneous localization and map construction based on optimized RBPF[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 30-34.
4. Chen Baifan, Cai Zixing, Yuan Cheng. SLAM method for mobile robot based on particle swarm optimization [J]. Robotics, 2009, 31(6): 513-517.
5. . Hu Mingchao. Construction and optimization of mobile robot map based on laser SLAM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.