

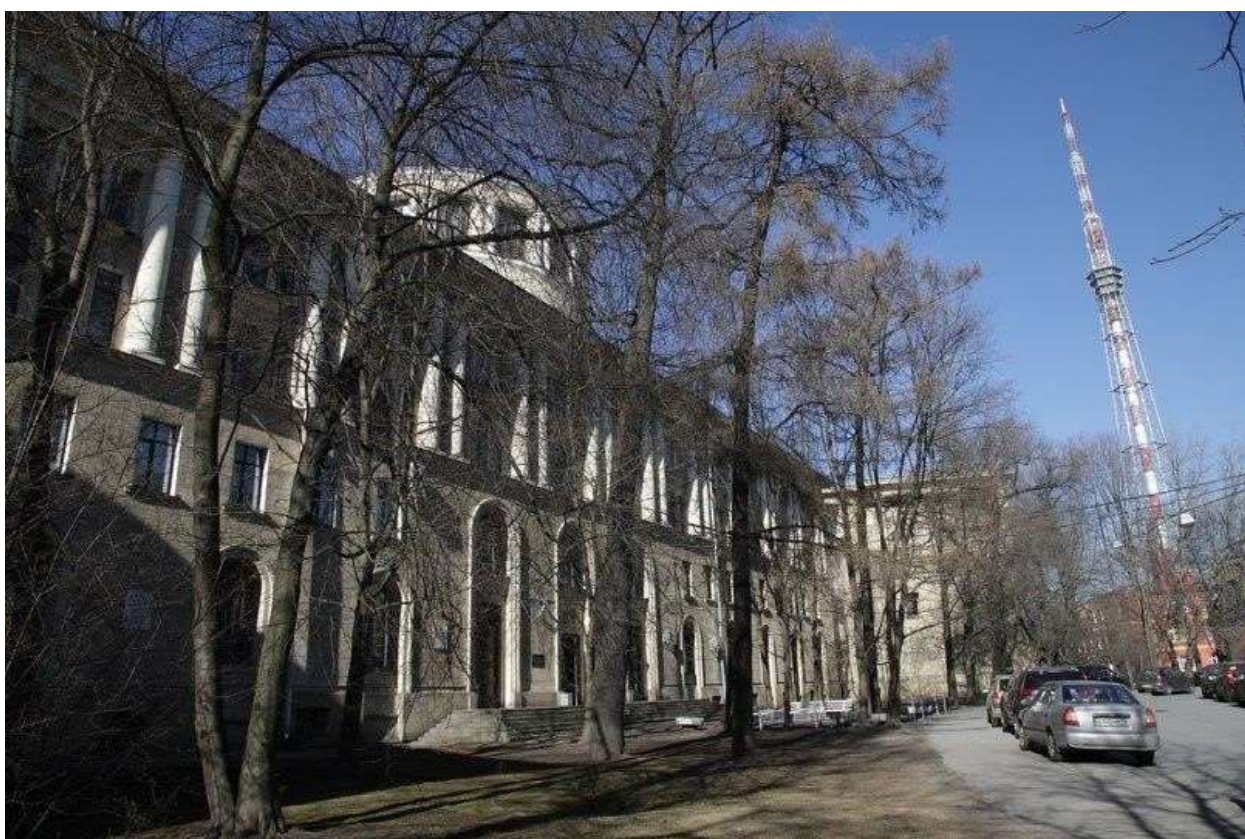
ННБ XIV, Санкт-Петербург, 16 – 18 мая 2026

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»

ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



Сборник материалов конференции
16 – 18 мая 2026

Том II

Санкт-Петербург
2026

УДК 001.2

XIV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО» для студентов, аспирантов и молодых ученых.

Том 2. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026. 115 с.

Организаторы:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Тематика конференции включает следующие направления

- *Информационные радиотехнические системы и устройства*
- *Информатика и управление в технических системах и ВТ*
- *Программная инженерия и автономные интеллектуальные системы*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Алгоритмическая математика*
- *Управление и обработка информации*
- *Приборостроение*
- *Лингвистика*
- *Электроника, нанотехнологии, наноматериалы*
- *Системный анализ и информационная безопасность*
- *Электрические системы, привод, автоматика и электротехнологии*
- *Биотехнические системы и технологии*
- *Техносферная безопасность*
- *Реклама и связи с общественностью*
- *Современные тренды управления качеством и цифровая экономика*
- *Инновационное проектирование: от реальных объектов к цифровым двойникам.*

Основной задачей конференции является развитие творческой активности студентов, привлечение их к решению актуальных задач в области науки и техники.

Сборник материалов содержит доклады, представленные на XIV Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, состоявшейся 16 – 18 мая 2026 года в Санкт-Петербурге, рекомендованные к публикации. Все доклады проходят рецензирование.

Оглавление

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ.....	4
ВЛИЯНИЕ ЖЁСТКОСТИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ.....	
Аббасов Г.А. ¹	4
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	
Дамдинцыренов Ц.Б.1, Королев В.В.2, Асадулов Р.2	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРИИ ВЕТЕРИНАРНО- САНИТАРНОГО КОНТРОЛЯ	
Жонин Е.А.1, Королев В.В.1, Королева А.В.2	12
СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С МОДАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ	
Козырев М.В.1.....	15
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОБУСА	
Кузьмицкая А.1, Королев В.В.1	20
ОТРАБОТКА СКАЧКООБРАЗНОГО ИЗМЕНЕНИЯ УСТАВКИ В СИСТЕМАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ.....	
Кучерявый А.И.1,2, Ухов А.А.1.....	24
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПАКЕТА ANSYS С САПР	
Руденко К.А.1, Ишин В.В.1.....	27
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛАБОРАТОРИИ САНИТАРНОГО КОНТРОЛЯ	
Соколов М.К.1, Королев В.В.1, Королева А.В.2.....	29
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	
Соколова У.Ю.1, Соклакова М.В.1	33
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕЧЕЙ ИПХТ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ РАСПЛАВА СТЕКЛА	
Солдатов Н.С.1, Лопух Д.Б.1, Скриган И.Н.1.....	37
ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫМИ СИСТЕМАМИ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	
Сюй В.1, Юань Ю.1	41
СИСТЕМА АКТИВНОЙ БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ	
Шувалова П.Д.1, Лавриновский В.С.1, Мигранов Р.М.1.....	44
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РАБОТЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА	
Якибчук С.Ю.1, Воробьев А.А. 2	47
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	51
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ НА БАЗЕ СЕРИЙНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	
Елисеев Е.И.1, Филатов Д.М.1.....	51

РАЗРАБОТКА ПРОФИОРИЕНТАЦИОННЫХ КЕЙСОВ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»	
Краснова С. ¹ , Цыкунова Н.В. ¹ , Салихов К.Ф. ¹	55
ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ	
Черноморец М.В.1, Горбатов М.М.1, Амбросовская Е.Б.1	57
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО АППАРАТА	
Черыков Л.А.1	59
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА АВТОНОМНОГО СУДНА ДЛЯ УКЛОНЕНИЯ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ	
Соловьев К.Д.1	62
МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО СЛИЯНИЯ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ИХ ДЕГРАДАЦИИ	
Ковалев Г.М.1, Гоголев Е.Е.1	66
ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ ИСР-КАЛИБРОВКИ ИНСТРУМЕНТА МАНИПУЛЯТОРА	
Шалимова А.С.1, Медвеженкова М. М. 1, Калуцкая Е.Д. 1	70
РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ РОТОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И КОМПЛЕКСА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ	
Подсевалов Ю.В.1	74
АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА	85
КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ АУДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	
Еременко Е.А.	85
ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ	
Ибатов Н.Э.	87
БЫСТРОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ФОРМ	
Иванов С.К.	91
УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К ИИ	
Куртова К.А.1, Вакуленко С.А.2	95
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА И НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОНА НА ПРИМЕРЕ АЛГОРИТМА GRAB CUT И АРХИТЕКТУРЫ U-NET	
Макаров И.А., Лязина Е.А., Нургаянова О.С.	98
ИТЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ТРАЕКТОРИИ ГРУППЫ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ	
Попова Д.А., Пироженко В.А.	103
ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНОВ ИСПОЛНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ К РСУБД МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ ГИСТОГРАММ	
Черепанов Р. П.	107
АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ НЕРАЗРЕШИМОСТЬ ДИОФАНТОВЫХ УРАВНЕНИЙ НАД КОЛЬЦОМ ЦЕЛЫХ ЧИСЕЛ И НР-ПОЛНОТА ИХ АНАЛОГОВ НАД КОНЕЧНЫМИ ПОЛЯМИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ	

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

ВЛИЯНИЕ ЖЁСТКОСТИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

АББАСОВ Г.А.¹

¹*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

Аннотация. В работе рассматривается влияние жёсткости питающей сети, характеризуемой отношением тока короткого замыкания к номинальному току нагрузки I_{sc}/I_l , на условия работы параллельного активного фильтра гармоник. Выявлены два механизма, посредством которых снижение жёсткости сети может ограничивать достижимый уровень компенсации высших гармоник: изменение условий формирования компенсирующего тока инвертором и обратное воздействие компенсирующего тока на напряжение в точке подключения фильтра. Показано, что существующий подход к выбору параметров активного фильтра, неявно предполагающий идеально жёсткую питающую сеть, не позволяет в явном виде учесть влияние данного параметра на эффективность компенсации. Отмечается практическая значимость рассматриваемых факторов применительно к системам электроснабжения горных предприятий.

Ключевые слова: активный фильтр гармоник, жёсткость сети, ток короткого замыкания, качество электроэнергии, горное предприятие, несинусоидальный режим, обратное воздействие

Введение

Системы электроснабжения горных предприятий характеризуются значительной долей нелинейных нагрузок — частотно-регулируемых приводов, подъёмных машин, насосных агрегатов, — которые являются источниками высших гармоник тока. При этом точки подключения мощных нелинейных нагрузок в горных сетях, как правило, удалены от питающих подстанций, что в сочетании с ограниченной мощностью трансформаторов распределительных пунктов обуславливает пониженные значения отношения тока короткого замыкания к номинальному току нагрузки I_{sc}/I_l [5, 8]. Стандарт IEEE 519-2022 относит сети с $I_{sc}/I_l < 20$ к категории, для которой устанавливаются наиболее жёсткие требования по допустимым гармоникам тока нагрузки [1], что свидетельствует о практической значимости данного параметра при выборе средств обеспечения качества электроэнергии.

Среди технических средств компенсации высших гармоник параллельный активный фильтр обеспечивает широкополосное подавление в замкнутом контуре управления и лишён принципиальных ограничений, присущих пассивным фильтрам. Вместе с тем при теоретическом рассмотрении принципа действия фильтра, как правило, принимается допущение о синусоидальности напряжения в точке его подключения и о независимости этого напряжения от компенсирующего тока, что фактически соответствует условию идеально жёсткой питающей сети. Существующие инженерные методики выбора

параметров фильтра, основанные на данном допущении, не позволяют в явном виде оценить, в какой мере снижение I_{sc}/I_l влияет на достижимую эффективность компенсации [3, 7].

В связи с изложенным представляется целесообразным рассмотреть, какие ограничения жёсткость питающей сети может накладывать на условия работы активного фильтра, и определить факторы, требующие учёта при проектировании фильтрокомпенсирующих устройств для горных предприятий.

Первый механизм: изменение условий формирования компенсирующего тока

Способность инвертора активного фильтра воспроизводить компенсирующий ток определяется, в том числе, превышением напряжения звена постоянного тока над мгновенным напряжением сети в точке подключения. Данный запас определяет предельную скорость нарастания тока через выходной дроссель и, следовательно, возможность отслеживания высших гармоник тока нагрузки. Чем выше номер компенсируемой гармоники, тем более высокая скорость нарастания тока требуется от инвертора, и тем сильнее сказываются на качестве компенсации колебания напряжения сети [3, 6].

В сети с пониженной жёсткостью напряжение в точке подключения фильтра может изменяться в зависимости от режима работы нагрузки, причём амплитуда этих изменений тем больше, чем меньше I_{sc}/I_l . Это обстоятельство может приводить к тому, что в отдельные моменты времени располагаемый запас напряжения инвертора оказывается недостаточным для отслеживания высших гармоник, что влечёт снижение эффективности компенсации в данных режимах. Из изложенного следует, что при прочих равных условиях в сети с пониженной жёсткостью может потребоваться более высокое напряжение звена постоянного тока по сравнению с оценкой, полученной в предположении о жёсткой сети. Вопрос определения параметров импеданса сети в реальных условиях эксплуатации рассматривается, в частности, в работе [5].

Второй механизм: обратное воздействие компенсирующего тока на напряжение сети

В идеализированной расчётной схеме напряжение в точке подключения активного фильтра принимается независимым от протекающих через неё токов. В реальной сети компенсирующий ток, протекая через импеданс сети, создаёт дополнительное падение напряжения на гармонических составляющих. Поскольку индуктивное сопротивление сети возрастает пропорционально порядку гармоники, а мощность короткого замыкания в точке подключения определяет величину этого сопротивления, снижение I_{sc}/I_l приводит к увеличению относительного изменения напряжения от обратного воздействия, причём данный эффект нарастает для высших гармоник. Взаимодействие активного фильтра с импедансом сети может в ряде случаев приводить к нежелательным колебательным режимам, что отмечается в работах [4, 7].

Зависимость стандартных алгоритмов управления активным фильтром от измеренного напряжения сети является предметом ряда исследований, направленных на разработку методов, не требующих его прямого измерения [9, 11]. В жёсткой сети изменение напряжения от обратного воздействия пренебрежимо мало и не оказывает существенного влияния на работу системы управления. При снижении жёсткости сети данный эффект может становиться заметным и требует учёта при выборе алгоритма управления [4, 7].

Совместное влияние рассмотренных факторов

Рассмотренные механизмы действуют в одном направлении: снижение I_{sc}/I_l одновременно уменьшает располагаемый запас напряжения инвертора и усиливает обратное воздействие компенсирующего тока на напряжение в точке подключения. Направленность совместного влияния данных факторов на эффективность компенсации прослеживается из качественного анализа, не требуя дополнительных допущений. Количественная оценка их суммарного воздействия на остаточный уровень гармоник требует учёта нелинейного характера системы и взаимодействия между рассмотренными механизмами, что может быть получено методами имитационного моделирования [8, 10].

Из изложенного следует, что при проектировании активного фильтра для сети с известным значением I_{sc}/I_l целесообразно учитывать оба рассмотренных фактора. В частности, для достижения нормируемых ГОСТ 32144-2013 [2] значений коэффициента гармонических искажений в сети с пониженной жёсткостью может потребоваться либо увеличение параметров фильтра по сравнению с оценками, полученными в предположении о жёсткой сети, либо применение алгоритмов управления, разработанных для условий несбалансированной или слабой сети [3, 6], либо использование гибридных топологий фильтрокомпенсирующих устройств.

Заключение

Выявлены и качественно охарактеризованы два механизма, посредством которых пониженная жёсткость питающей сети может ограничивать эффективность работы параллельного активного фильтра гармоник. Первый связан с возможным сокращением располагаемого запаса напряжения инвертора вследствие колебаний напряжения в точке подключения, второй — с обратным воздействием компенсирующего тока на это напряжение через импеданс сети. Оба механизма действуют в одном направлении, и их совокупное влияние нарастает по мере снижения I_{sc}/I_l .

С практической точки зрения полученные результаты указывают на следующее. При проектировании активного фильтра для горной сети с известным значением I_{sc}/I_l целесообразно: закладывать повышенное напряжение звена постоянного тока относительно значения, рассчитанного для жёсткой сети; применять алгоритмы управления, разработанные с учётом нежёсткости питающей сети; обращаться к гибридным схемам фильтрокомпенсирующих устройств как предпочтительному решению по сравнению с чисто активными при особо низких значениях I_{sc}/I_l . В отличие от стандартного подхода, в котором жёсткость сети не фигурирует в явном виде при выборе параметров фильтра, предложенное рассмотрение позволяет учесть влияние данного параметра уже на этапе предварительного проектирования.

Список литературы

1. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
3. Zhou L., Han W., Qi J., Zhou Z. Adaptive PI + VPI Harmonic Current Compensation Strategy under Weak Grid Conditions // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 10. Art. 5983. DOI: 10.3390/app13105983.
4. Xie Y., Yi H., Zhuo F., Li Y., Jiang X., Zhang Z. Analysis and stabilization for full harmonic compensation oscillation in SAPF system with source current direct control // IET Power Electronics. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 107–120. DOI: 10.1049/pel2.12619.
5. Skamyin A.N., Dobush V.S., Jopri M.H. Determination of the grid impedance in power consumption modes with harmonics // Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 261. P. 443–454. DOI: 10.31897/PMI.2023.25.

6. Alathamneh M., Ghanayem H., Nelms R.M. Shunt active power filter voltage sensorless method using a PR controller for unbalanced grid conditions // Energy Reports. 2023. Vol. 9, Suppl. 1. P. 1056–1064. DOI: 10.1016/j.egy.2022.12.003.
7. Li Y., Yi H., Zhuo F., Jiang X. Harmonic Oscillation and Stabilization Strategy of Source-Current-Detected Shunt APF Considering Interaction With Nonlinear Load and Grid Impedance // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2024. Vol. 12, No. 1. P. 420–430. DOI: 10.1109/JESTPE.2023.3329171.
8. Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Зимин Р.Ю., Аладьин М.Е. Анализ эффективности работы параллельного активного фильтра в промышленной системе электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах // Промышленная энергетика. 2023. № 6. С. 21–31.
9. Karbasforooshan M.-S., Monfared M. Grid voltage sensorless control of a single-phase shunt hybrid active power filter // IET Power Electronics. 2024. Vol. 17, No. 6. P. 752–763. DOI: 10.1049/pel2.12689.
10. Qaisar M.W., Lai J., Fang J. Modeling and Control of Grid-Forming Active Power Filters for Harmonic Suppression and Enhanced Power Quality // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 11. Art. 5927. DOI: 10.3390/app15115927.
11. Nour A.M.M., Helal A.A. A voltage sensorless technique for a shunt active power filter adopting band pass filter under abnormal supply conditions // Electric Power Systems Research. 2025. Vol. 238. Art. 111133. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.111133.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

ДАМДИНЦЫРЕНОВ Ц.Б.1, КОРОЛЕВ В.В.2, АСАДУЛОВ Р.2

1СПбГУПТД, Высшая школа технологии и энергетики

2Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Статья рассматривает вопросы модернизации электропривода рециркуляционного насоса водогрейной котельной. Котельная обеспечивает теплоснабжением район Ленинградской области. Необходимость данной модернизации обусловлена износом существующей котельной. При проведении модернизации были выбраны необходимые элементы электропривода и системы автоматизированного управления им. Также проведено математическое описание и моделирование всей системы в программном комплексе Matlab Simulink. Результаты проведенной работы могут быть использованы для проведения модернизации других котельных, обеспечивающих теплом районы и города страны.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, моделирование, система теплоснабжения, водогрейная котельная

Водогрейные котельные, как центральные источники тепла, потребляют значительное количество электроэнергии, существенная доля которой приходится на привод циркуляционных и сетевых насосов. Устаревшее насосное оборудование с фиксированной производительностью часто работает в режимах, не соответствующих реальной тепловой нагрузке, что приводит к перерасходу электроэнергии, повышенному износу и неоптимальным гидравлическим режимам всей системы. Модернизация такого оборудования с применением современных технологий, в частности частотно-регулируемого привода (ЧРП), представляет собой актуальную задачу, позволяющую достичь существенной экономии энергоресурсов, повысить надежность и автоматизировать работу котельной. Это напрямую соответствует государственной политике в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный проект модернизации может быть реализован на конкретном объекте. Его внедрение позволит снизить эксплуатационные расходы на электроэнергию, уменьшить аварийность оборудования, оптимизировать гидравлический режим системы и повысить уровень автоматизации котельной

Работа водогрейной котельной основана на непрерывном цикле нагрева и циркуляции горячей воды, а надежность и экономичность обеспечиваются комплексом основного и вспомогательного оборудования, работающего под управлением автоматизированной системы контроля.

Работа рассматриваемой котельной обеспечивается двумя асинхронными двигателями. Один из которых обеспечивает работу насосного агрегата, а другой – работу рециркуляционного насоса. Целью работы является разработка проекта модернизации рециркуляционного насоса 1Д320-70 для повышения энергоэффективности и надежности его работы.

Основные технические характеристики насоса сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Технические характеристики насоса

Параметр, единица измерения	Значение
Напор, м	50
Подача (расход) воды, м ³ /час	320
Температура перекачиваемой среды, град	До +150
Скорость вращения, об/мин	1500
Условный проход (DN), мм	320

Полезная (гидравлическая) мощность

$$P_z = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{\text{макс}}}{3600} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 320}{3600} = 43600 \text{ Вт}$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; H – напор, $Q_{\text{макс}}$ – расход воды.

Мощность на валу насоса

$$P_{\text{в}} = \frac{P_z}{\eta} = \frac{43600}{0,77} = 56600 \text{ Вт}$$

где η – КПД насоса.

Для центробежных насосов общего назначения запас мощности составляет 10÷15 %, тогда мощность электродвигателя

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{в}} \cdot k_{\text{зан}} = 56600 \cdot 1,15 = 65100 \text{ Вт}$$

По рассчитанной мощности произведем выбор электродвигателя. Указанной мощности подходит электродвигатель 4А250S4У3, который имеет мощность 75кВт, синхронная частота вращения 1500 об/мин.

Характеристики двигателя представлены в таблице 2.

Таблица 2

Технические характеристики электродвигателя 4А250S4У3

Параметр	Значение
Номинальная мощность	75 кВт
Номинальное напряжение	380/600 В
Номинальное скольжение	0,012
Синхронная скорость	1500 об/мин
Число полюсов	4
КПД	93,6 %
Ток	138,3 А
Коэффициент мощности	0,88

Коэффициент пуска по моменту	2,2
Перегрузочная способность	2,3
Момент инерции двигателя	0,35 кг·м ²
Масса	497 кг

Мощность ПЧ должна быть не меньше мощности двигателя. Выбираем ПЧ на 90 кВт. Это стандартный ряд мощностей, который обеспечивает запас по току и перегрузочной способности. Номинальный ток ПЧ должен быть больше или равен номинальному току двигателя. Требуемый ток ПЧ должен быть больше 138 А. В каталоге ПЧ на 90 кВт (380В) номинальный ток обычно составляет ~176 А.

Выберем преобразователь частоты фирмы Vacon серии NXP. Под заданные параметры подходит преобразователь Vacon NXP 0168 5A2H0SSS.

Исходя из номинальных паспортных данных двигателя следует произвести расчет необходимых параметров для запуска его модели в среде моделирования Simulink. Модель электродвигателя представлена на рисунке 1. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

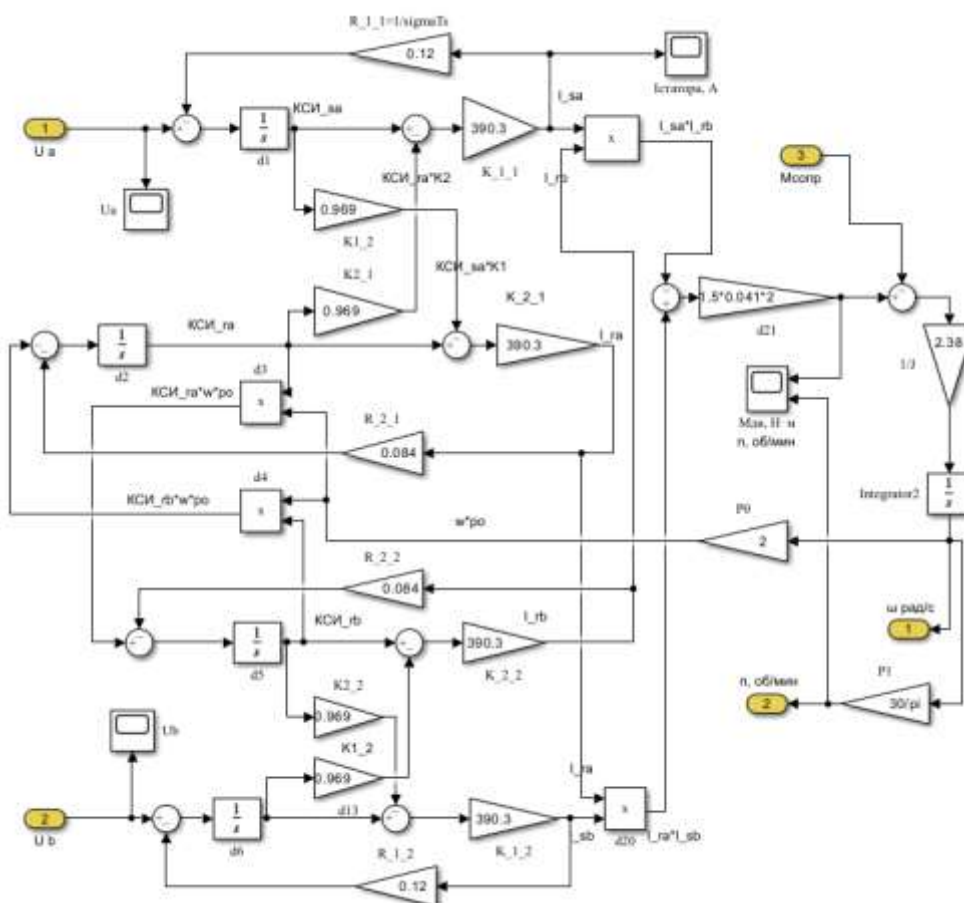


Рис. 1. Модель электродвигателя насосного агрегата

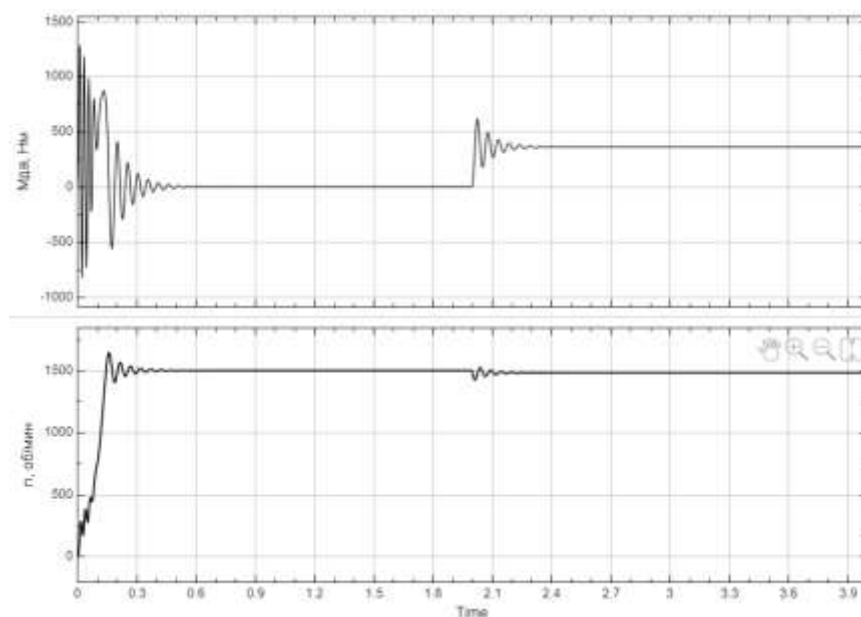


Рис. 2. График момента и скорости электродвигателя насосного агрегата

На графике номинальная скорость 1500 об/мин устанавливается за 0,5с. После подачи возмущающего воздействия со стороны нагрузки в виде момента сопротивления скорость снижается до 1480 об/мин.

Момент электродвигателя становится равным 360 Нм на 3 секунде после подключения нагрузки к валу электродвигателя.

Преобразователь частоты позволяет управлять скоростью электродвигателя за счет изменения частоты подаваемого напряжения. Поскольку электродвигатель управляет рециркуляционным насосом, то такая нагрузка является вентиляторной и в этом случае рекомендуется применять частотный преобразователь.

Структурная схема преобразователя представлена на рисунке 3.

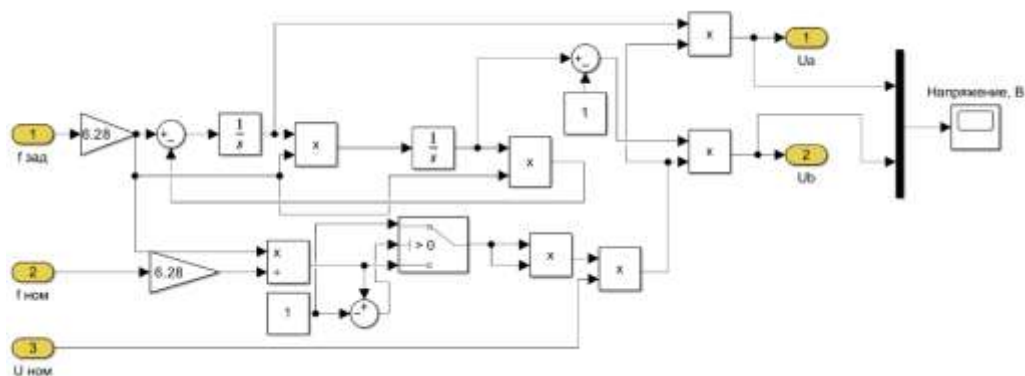


Рис. 3. Модель преобразователя частоты с вентиляторной нагрузкой

Для построения модели рециркуляционного насоса воспользуемся технологической схемой котельной. Она состоит из водогрейных котлов, сетевого и рециркуляционного насосных агрегатов, трубопровода, обратного клапана и задвижки трубопровода. Таким образом, трубопровод можно рассматривать как элемент с постоянным гидравлическим сопротивлением, которое складывается из сопротивлений труб, самого насоса и задвижки трубопровода.

На рисунке 4 представлена структурная схема модернизированного рециркуляционного насоса с частотным управлением. Помимо рассмотренных блоков в схему добавлены задатчик интенсивности и ПИД регулятор. Они предназначены для настройки работы всей модели в целом и улучшают свойства взаимодействия блоков между собой.

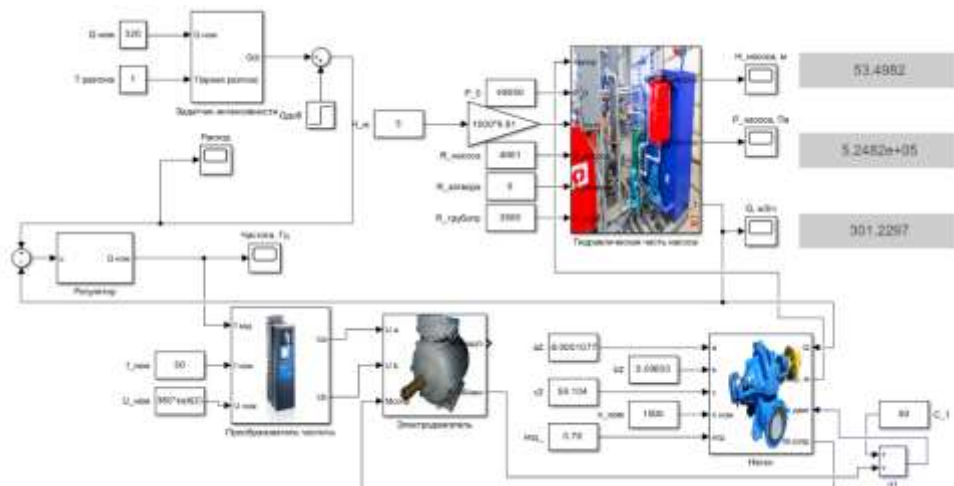


Рис. 4. Замкнутая система регулирования воды насосного агрегата

Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

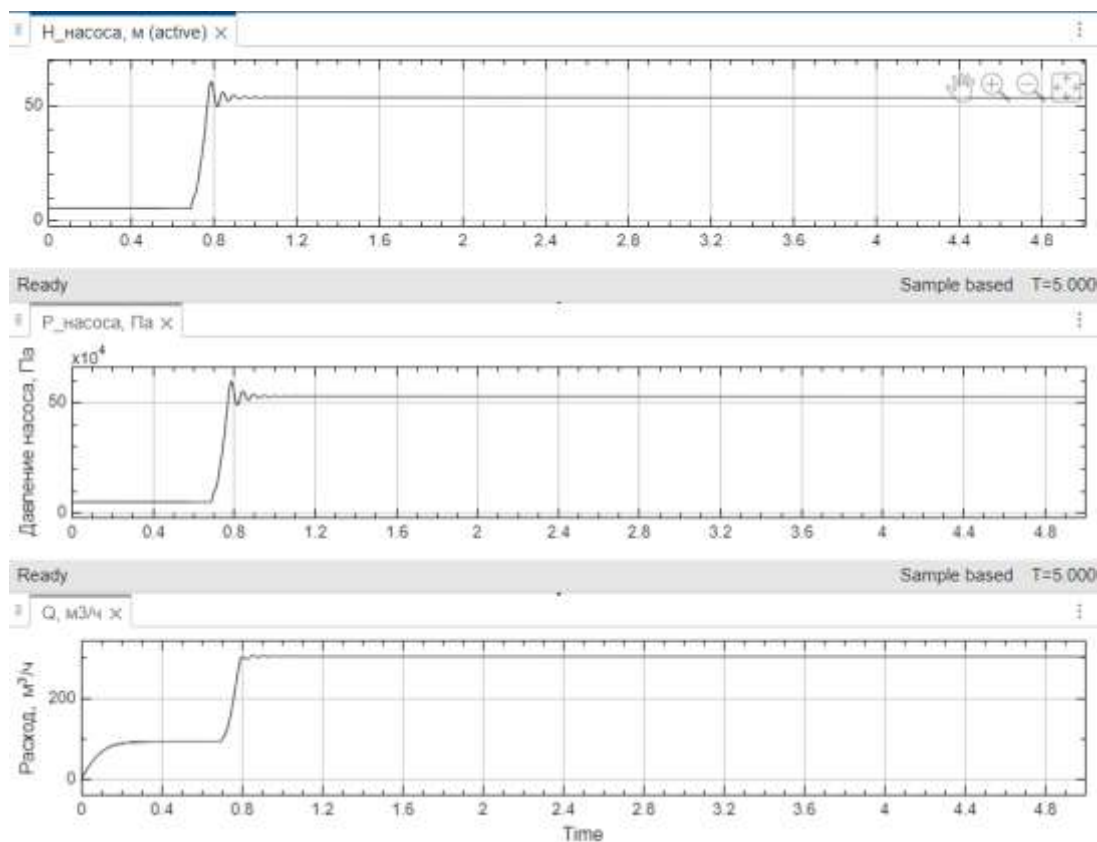


Рис. 5. Характеристики насосного агрегата

Моделирование проводилось при следующих условиях: задатчик интенсивности обеспечивает плавное изменение задаваемой величины расхода воды за счет сглаживания

начальных и конечных участков траектории. ПИД регулятор предусматривает воздействие регулятора со скоростью пропорциональной отклонению регулируемой величины. В схеме также происходит ограничение начальной скорости на уровне 100 об/мин и напора на уровне 5м, что незначительно вносит погрешность в процесс моделирования, однако позволяет избежать сингулярности.

Из рисунков видно, что при задаваемом расходе 320 м³/ч и времени установления задаваемого расхода в 1 секунду двигатель выходит на установившийся режим 1500 об/мин при моменте 301 Нм, напоре 53 м, давлении насоса 525 кПа и расходе 301 м³/ч. Меньшее значение расхода обусловлено потерями в трубопроводе.

Список литературы

1. Фалищенко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб.пособие. - М.: Изд-во «Горная книга», 2011. 260 с.
2. Королев В.И. Системы управления электроприводом: учеб.-метод. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА ЛАБОРАТОРИИ ВЕТЕРИНАРНО-САНИТАРНОГО КОНТРОЛЯ

Жонин Е.А.1, КОРОЛЕВ В.В.1, КОРОЛЕВА А.В.2

1СПбГУПТД, Высшая школа технологии и энергетики

2КГАУ, Институт «Казанская академия ветеринарной медицины имени Н.Э.Баумана»

Аннотация. Данная статья посвящена модернизации лаборатории ветеринарно-санитарного контроля с целью улучшения технических возможностей и усовершенствования условий эксплуатации данной лаборатории. Лаборатория предназначена для выполнения в том числе экспертизы продукции животного и растительного происхождения. В своем составе лаборатория имеет грузоподъемный комплекс, снабженный электроприводом. Данный комплекс был модернизирован путем замены отдельных его частей и настроен на оптимальную эффективность.

Ключевые слова: электропривод, моделирование, лаборатория санитарного контроля, подъемный комплекс

Лаборатория ветеринарно-санитарного контроля — важное звено в системе защиты здоровья населения и животных. Её ключевая задача — предотвращение распространения заболеваний, общих для человека и животных. Специалисты лаборатории проводят ветеринарно-санитарную экспертизу продукции животного происхождения: мяса, молока, рыбы, мёда и т.д. Также исследуется растительная продукция непромышленного изготовления, поступающая на рынки. В рамках экспертизы выполняются: органолептические исследования (оценка внешнего вида, запаха, консистенции и т.п.); лабораторные анализы (биохимические, бактериологические и др.); специальные тесты.

В лаборатории ветеринарно-санитарного контроля грузоподъемный механизм — вспомогательное оборудование, необходимое для безопасной и эффективной работы с тяжёлыми и габаритными объектами. Основные задачи механизма: перемещение туш животных или их крупных частей между зонами лаборатории (приёмка, экспертиза, утилизация); транспортировка ёмкостей с пробами, реактивами или отходами (в т.ч. биологическими); обеспечение эргономики и безопасности труда — снижение физической нагрузки на персонал при работе с грузами.

Таким образом, цель данной работы – модернизация электроприводной системы грузоподъемного механизма.

Параметры грузоподъемного механизма сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры подъемника

Параметр, единица измерения	Обозначение	Значение
Высота подъема, м	h	40
Грузоподъемность, кг	m_{max}	200
Скорость подъема груза, м/с	v	0,3
Масса грузовой каретки подъемника, кг	$m_{плат}$	150
Диаметр барабана лебедки, м	$d_{бар}$	0,159
Момент инерции барабана, кг·м ²	$J_{бар}$	15
Момент инерции муфты, кг·м ²	$J_{муф}$	0,012
КПД редуктора, %	$\eta_{ред}$	97
КПД остальных механизмов системы, %	$\eta_{мех}$	80
Время разгона, с	t_p	1

Мощность $P_{вых}$ на приводном валу электропривода определяется по формуле:

$$P_{вых} = \frac{(m_{max} + m_{плат}) \cdot g \cdot v}{1000} = \frac{(500 + 150) \cdot 9.83 \cdot 0.3}{1000} = 1.91 \text{ кВт}$$

где m_{max} – грузоподъемность подъемника; $m_{плат}$ – масса всех элементов каретки; v – линейная скорость каретки.

С учетом потерь в приводе потребляемая мощность электродвигателя составляет 2,46 кВт. Был выбран асинхронный двигатель АИРС 100 S4.

Далее были определены параметры схемы замещения электродвигателя и построены механическая характеристика электродвигателя, представленная на рисунке 1 и электромеханическая характеристика, представленная на рисунке 2.

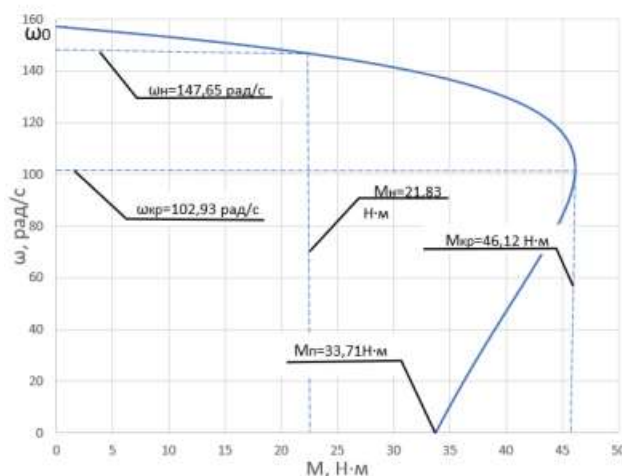


Рис. 1. Естественная механическая характеристика электродвигателя

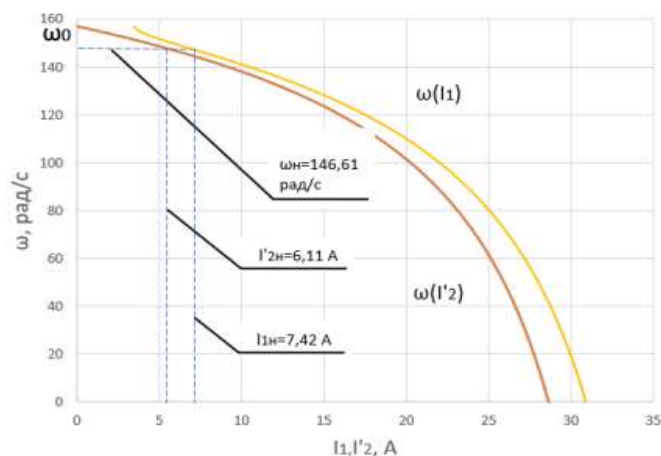


Рис. 2. Естественные электромеханические характеристики электродвигателя

Для данной электроприводной системы нецелесообразно использовать преобразователь частоты из-за отсутствия необходимости в регулировании скорости, поэтому было принято использовать для управления пуском и остановом двигателя устройство плавного пуска.

Далее было произведено моделирование пуска асинхронного двигателя в среде Matlab Simulink 2025. Был использован библиотечный асинхронный электродвигатель, в который введены рассчитанные параметры схемы замещения. Моделирование производилось при трех режимах работы электродвигателя: номинальном (21,83 Нм), при половине номинальной нагрузки (16,33 Нм) и при холостом ходе. Фиксировались значения момента, угловой скорости и тока статора. Также была построена механическая характеристика электродвигателя.

Результаты моделирования показали, что при всех видах нагрузки прямой пуск сильно влияет на механическую часть привода колебаниями в момент запуска, в пике момент достигал значений 90 Нм, что в 1,8 раза выше пускового момента, поэтому было принято решение уменьшить значение момента внешними воздействиями.

Для этих целей была разработана модель асинхронного электродвигателя с устройством плавного пуска, представленная на рисунке 3.

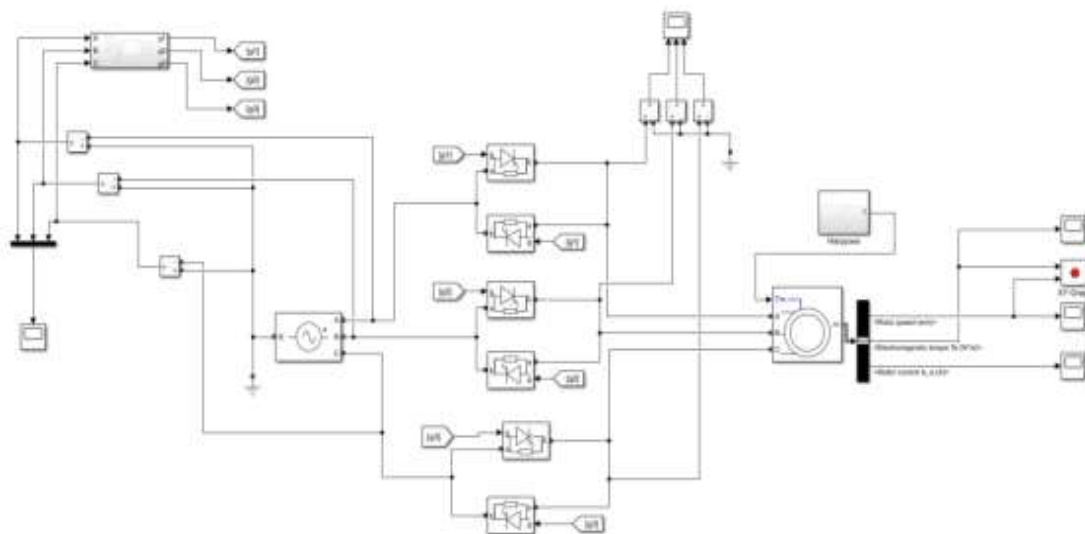


Рис. 3. Модель системы плавного пуска асинхронного электродвигателя

Результаты моделирования в виде механической характеристики электродвигателя представлены на рисунке 4.

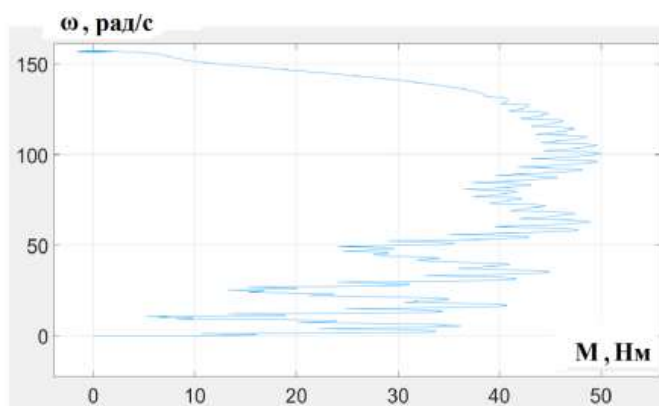


Рис. 4. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя при плавном пуске

Также были получены графики момента, угловой скорости и тока статора. Таким образом, удалось добиться снижения пика колебаний пускового момента до значения 46 Нм и пускового тока до 36А.

Список литературы

1. Харитонов М.С. Электрические машины: Учебно-методическое пособие. - Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 104 с.
2. Прокопов А.А. Разработка схемы управления – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – 14 с.

СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С МОДАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

КОЗЫРЕВ М.В.1

1Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Статья посвящена синтезу следящей системы электропривода с упругой механической связью. Разработана математическая модель объекта управления с учётом упругости передачи. Синтезирован традиционный модальный регулятор, обеспечивающий желаемую динамику, но недостаточную точность. Для повышения точности предложен модифицированный модальный регулятор с расширенной размерностью.

Ключевые слова: следящая система, модальное управление, модифицированный модальный регулятор для двухмассовой электромеханической системы, точность, добротность

Современные следящие системы должны удовлетворять строгим требованиям как к динамике переходных процессов, так и к точности отработки задающих воздействий. Одним из эффективных подходов к обеспечению желаемых динамических свойств является модальное управление [1], основанное на размещении полюсов в заданных точках комплексной плоскости. Однако классический синтез модального регулятора не всегда гарантирует требуемую точность, которая в следящих системах характеризуется порядком астатизма и значением добротности по скорости. В связи с этим актуальной становится задача синтеза системы, обеспечивающей одновременно заданное размещение полюсов и необходимое значение добротности.

В качестве объекта управления в работе рассматривается электропривод антенны радиолокационной станции гражданского самолёта, представляющий собой двухмассовую

электромеханическую систему с упругой связью приводного двигателя и механизма антенны [2]. На рис. 1 представлена структурная схема следящей системы четвертого порядка.

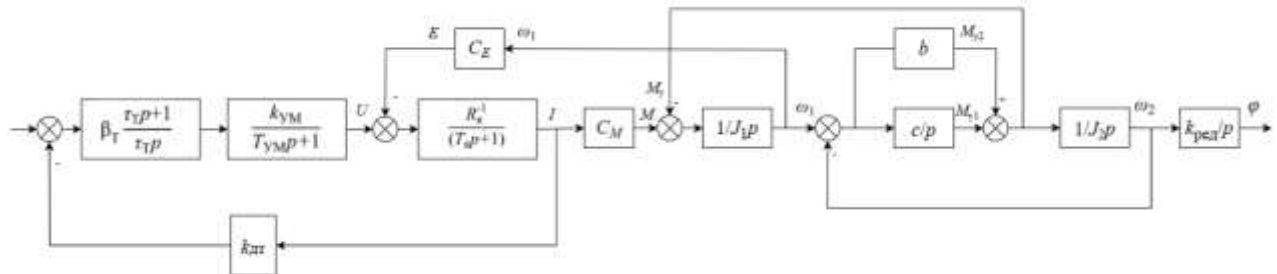


Рис. 1. Структурная схема следящей системы

Далее рассматривается синтез традиционного модального регулятора. В качестве желаемого характеристического полинома был выбран полином Грехема-Летропа 4-го порядка:

$$D_{\text{ж}}(p) = p^4 + 2.1\omega_0 p^3 + 3.4\omega_0^2 p^2 + 2.7\omega_0^3 p + \omega_0^4.$$

Найдя характеристический полином системы по следующей формуле:

$$D(p) = \det(pI - \tilde{A}) = \det(pI - (A - BK))$$

и приравняв $D(p) = D_{\text{ж}}(p)$, были вычислены коэффициенты традиционного модального регулятора: $k_1 = 0.02536$, $k_2 = -62.8246$, $k_3 = -0.01448$, $k_4 = 0.1019$.

В пакете *Simulink* была составлена схема системы с традиционным модальным регулятором и единичным коэффициентом передачи, представленная на рис. 2, и промоделирована для анализа переходных процессов, где график переходной характеристики представлен на рис. 3, а график ошибки регулирования при подаче гармонического задающего воздействия с амплитудой $A = 0.0873$ рад и частотой $f = 0.16$ Гц – на рис. 4.

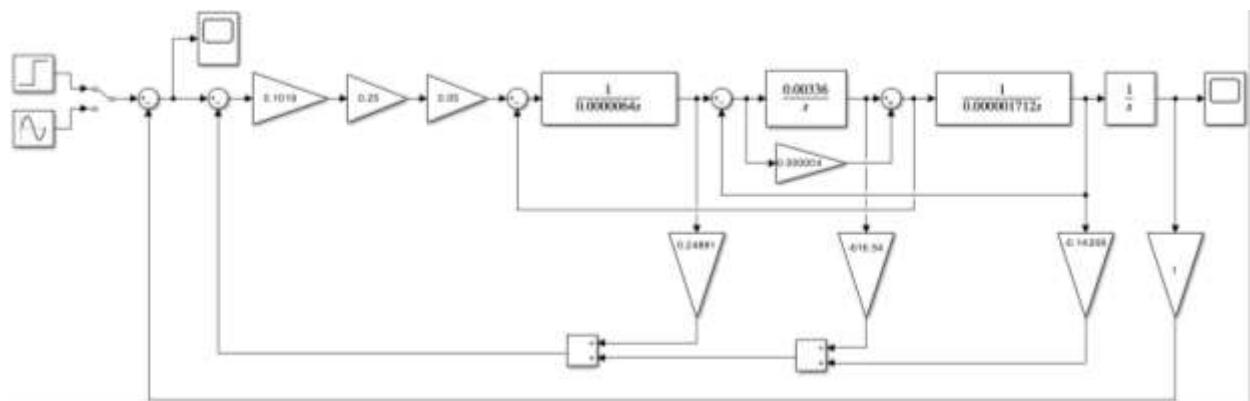


Рис. 2. Схема системы с модальным управлением и единичным коэффициентом передачи

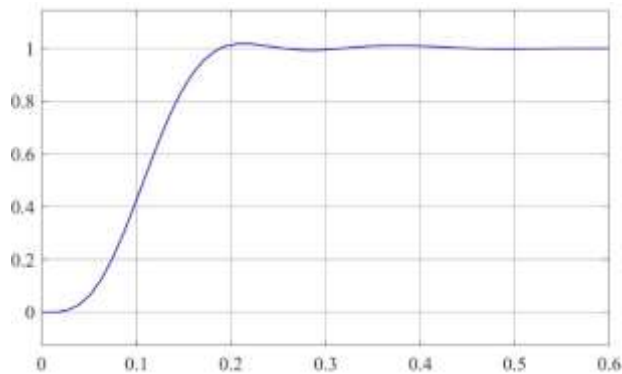


Рис. 3. График переходной характеристики системы с традиционным модальным регулятором

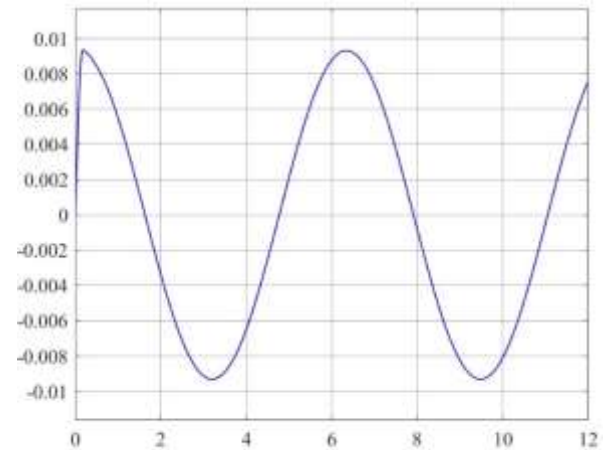


Рис. 4. График ошибки регулирования при гармоническом задающем воздействии ($A = 0.0873$ рад, $f = 0.16$ Гц)

Анализ полученной системы показывает, что хотя динамические показатели соответствуют требованиям, значение добротности, рассчитанное по формуле:

$$k'_\omega = \frac{\omega_0}{f_3} = \frac{25}{2.7} = 9.26,$$

оказывается недостаточным для обеспечения заданной точности. Вид логарифмической амплитудной частотной характеристики (далее ЛАХ) разомкнутой системы показан на рис. 5, а.

Чтобы система имела заданное значение добротности k_ω , форма ее ЛАХ должна быть такой, как на рис. 5, б. Суть модификации [3] заключается в том, чтобы в контуре положения было дополнительно сформировано эквивалентное последовательное звено с передаточной функцией

$$W_k(p) = \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \frac{\tau_2 p + 1}{\tau_1 p + 1},$$

что приводит к увеличению наклона ЛАХ в низкочастотной области. При этом передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$W_p(p) = W_k(p) \cdot W'_p(p),$$

где $W'_p(p)$ – передаточная функция, соответствующая системе с традиционным модальным регулятором.

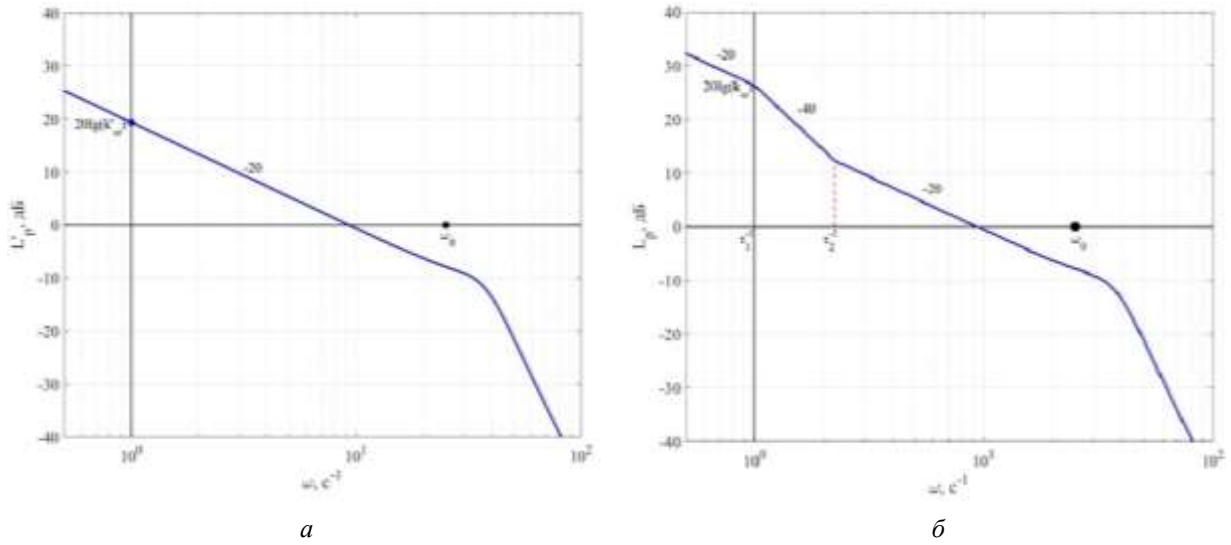


Рис. 5. ЛАХ разомкнутой системы при использовании традиционного модального регулятора (а) и при использовании модифицированного модального регулятора (б)

Согласно методике синтеза модифицированного модального регулятора, показанной в работе [3], был выполнен расчёт следящей системы с модальным управлением и заданной точностью.

Для обеспечения заданной точности были вычислены добротность системы, частота первого излома желаемой ЛАХ, частота второго излома желаемой ЛАХ:

$$k_{\omega} = \sqrt{2} \frac{\omega_i \theta_{\text{вх} m}}{\theta_d} = \sqrt{2} \frac{2\pi f \theta_{\text{вх} m}}{\theta_d} = \sqrt{2} \frac{2\pi \cdot 0.16 \cdot 0.0873}{0.006} = 20.68 \text{ c}^{-1},$$

$$\tau_1^{-1} = 2\pi f = 2\pi \cdot 0.16 = 1 \text{ c}^{-1},$$

$$\tau_2^{-1} = \tau_1^{-1} \frac{k_{\omega}}{k_{\omega'}} = 1 \cdot \frac{20.68}{9.26} = 2.233 \text{ c}^{-1}.$$

Далее были найдены полиномы $R(p)$, $Q(p)$, $q(p)$:

$$R(p) = \frac{W(p) - \omega_0^4}{p} = p^3 + f_1 \omega_0 p^2 + f_2 \omega_0^2 p + f_3 \omega_0^3 = p^3 + 52.5 p^2 + 2125 p + 42187.5,$$

$$Q(p) = \frac{1}{\tau_1} (\tau_1 p + 1) R(p) = p^4 + 53.5 p^3 + 2177.5 p^2 + 44312.5 p + 42187.5,$$

$$q(p) = \det(pI - \tilde{A}) = \det(pI - (A - BK)).$$

Приравняв полиномы $q(p)$ и $Q(p)$, были вычислены коэффициенты модифицированного модального регулятора: $k_1 = 50.539$, $k_2 = -0.23541$, $k_3 = -12413$, $k_4 = 0.24642$.

Коэффициент передачи контура скорости был найден следующий образом:

$$k_0 = W(p)|_{p=0} = [C(pI - \tilde{A})^{-1} B]|_{p=0} = \frac{1}{k_2 + k_4} = 90.82652,$$

а коэффициенты α_1 и α_2 вычислены по следующим формулам:

$$\alpha_1 = \frac{\omega_0}{k_0 f_3} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{25 \cdot 1}{90.82652 \cdot 2.7 \cdot 0.448} = 0.22756,$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \tau_2 = 0.22756 \cdot 0.448 = 0.10195.$$

Далее в пакете *Simulink* была составлена схема системы с модифицированным модальным регулятором, представленная на рис. 6, и промоделирована для анализа переходных процессов, где график переходной характеристики представлен на рис. 7, а график ошибки регулирования при подаче гармонического задающего воздействия с амплитудой $A = 0.0873$ рад и частотой $f = 0.16$ Гц – на рис. 8.

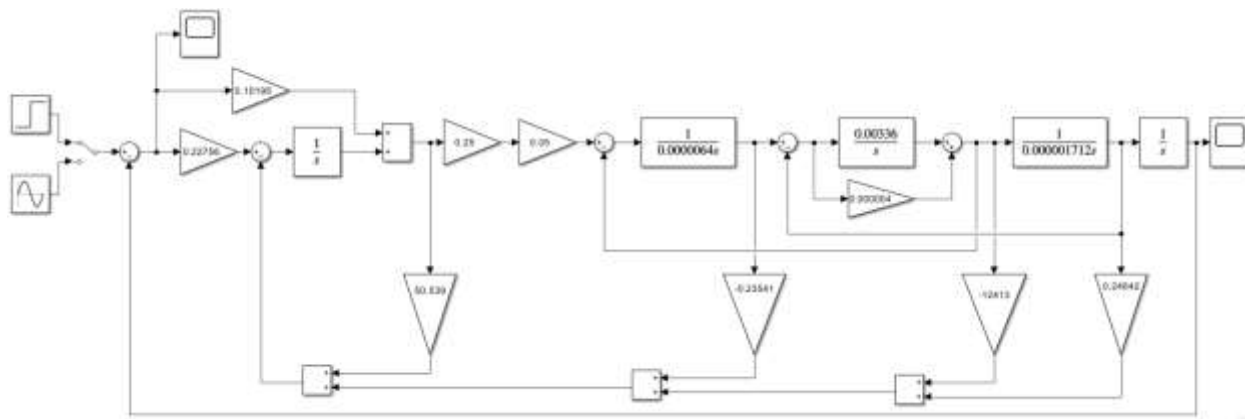


Рис. 6. Схема системы с модифицированным модальным регулятором

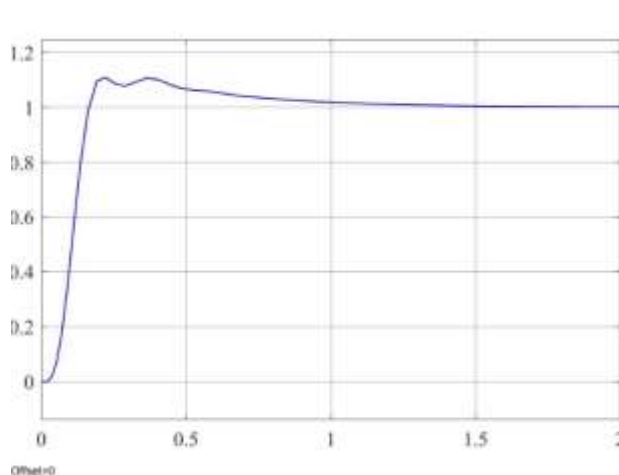


Рис. 7. График переходной характеристики системы с модифицированным модальным регулятором

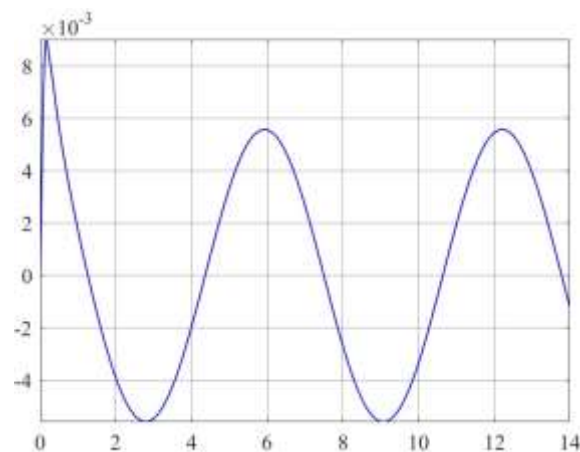


Рис. 8. График ошибки регулирования при гармоническом задающем воздействии ($A = 0.0873$ рад, $f = 0.16$ Гц)

Для синтезированной системы с модифицированным модальным регулятором динамические свойства несколько отличаются от динамических свойств системы с традиционным модальным регулятором, так как в передаточной функции разомкнутой системы появляется ноль $p = -\tau_2^{-1}$, но эти отличия незначительны, так как выполняется неравенство $\omega_0 > 10\tau_2^{-1}$.

Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-ти тт.; Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Второв В.Б. Синтез астатических систем с модальным управлением // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОБУСА

КУЗЬМИЦКАЯ А.1, КОРОЛЕВ В.В.1

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В данной статье рассмотрена методика подбора асинхронного электродвигателя для электробуса, которая включает в себя определение необходимых мощности и момента. Приведена модель двигателя и инвертора напряжения в среде Matlab Simulink, а также графики тока статора и скорости на валу асинхронного двигателя в зависимости от изменения параметра нагрузки: угла наклона дороги для электробуса.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тяговый электропривод, электробус

Расчет мощности и момента [1].

Исходные данные для вычисления необходимых мощности и момента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры электробуса для расчета мощности

Параметр	Численное значение
Полная масса электробуса, кг	18000
Максимальная скорость, км/ч	80
Площадь лобового сопротивления A , м ²	6,5
Коэффициент сопротивления воздуха k_B , Н·с ² /м ⁴	0,65
Коэффициент сопротивлению качению f_0	0,018
Число двигателей $z_{дв}$	2

$$P_{\max} = \frac{v_{\max}}{3600\eta_{\text{тр}}z_{\text{дв}}} (gm\psi_d + \frac{k_B A_B v_{\max}^2}{3,6^2})$$

где $\psi_d = f + \sin \alpha_d$ - сопротивление дороги; α_d - угол подъема дороги; $f = f_0 + k_f v^2$ - коэффициент сопротивлению качению ($k_f = 7 \cdot 10^{-7}$);

f_0 - коэффициент сопротивлению качению при малой скорости движения.

$$f = f_0 + k_f v^2 = 0,018 + 7 \cdot 10^{-7} \cdot 80^2 = 0,0225.$$

Учитывая неровности дороги, примем $f = 0,03$.

$$P_{\max} = \frac{80}{3600 \cdot 0,96 \cdot 2} (9,81 \cdot 18000 \cdot 0,03 + \frac{0,65 \cdot 6,5 \cdot 80^2}{3,6^2}) = 85,46 \approx 86 \text{ кВт}.$$

$$M_{\text{расч}} = \frac{(fmg \cos \alpha + 0,5c_x \rho_{\text{возд}} A v_{\max}^2 + mg \sin \alpha + m v_{\max} / t_p) r}{\eta_{\text{тр}} i}, \quad (1.1)$$

где c_x - аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления, r - радиус ведущего колеса, м, t_p - время разгона до максимальной скорости, с, i - передаточное число, $\rho_{\text{возд}}$ - плотность воздуха, кг/м³.

$$M_{\text{расч}} = \frac{(0,0225 \cdot 18000 \cdot 9,81 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1,202 \cdot 6,5 \cdot 22^2 + 18000 \cdot 22 / 35) \cdot 0,49}{0,96 \cdot 23} = 360 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Соответственно, для одного двигателя необходим момент:

$$M_{\text{д}} = 360 / 2 = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для данных требований по мощности и моменту подходит модель асинхронного двигателя АИР 250 М2. Характеристики АД представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики АИР 250 М2

Мощность, кВт	90	Класс защиты	IP55
Высота оси вращения, мм	250	Вес, кг	455
$I_{\text{п}} / I_{\text{н}}$	7,5	Количество полюсов	2
Климат. исполнение	У1	Напряжение, В	380/660
КПД	94	Ток статора	160,1/92,15
Габариты (ШхВхГ, м)	0,6х0,92х0,55	Коэффициент мощности	0,91
Момент инерции, кг·м ²	0,4	$M_{\text{п}} / M_{\text{н}}$	2
Частота вращения, об/мин	2975	$M_{\text{max}} / M_{\text{н}}$	2,3

Структурная схема асинхронного двигателя.

Расчет необходимых параметров для схемы замещения приведен в разделе 2 пособия [2]. На рисунке 1 представлена схема в Matlab для выбранного двигателя АИР 250 М2.

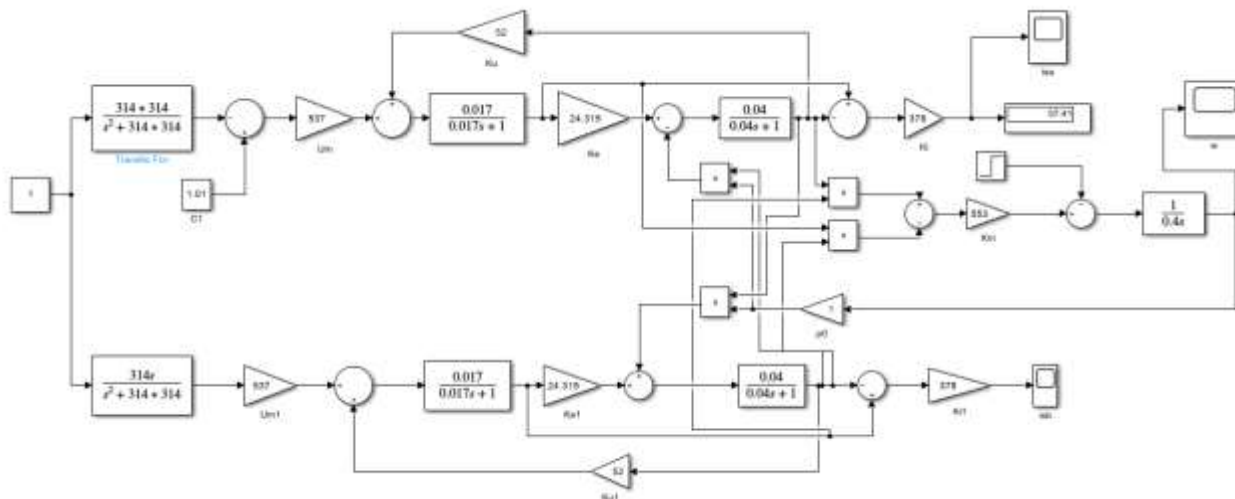


Рис. 1. Структурная схема динамической модели двигателя

Так как в электробусе установлены конденсаторные батареи, то нужно изменить предыдущую схему замещения двигателя, добавив инвертор напряжения и блок преобразования Кларка.

На рисунке 2 представлена модель широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для этого необходимо иметь 3 синусоидальных сигнала, сдвинутых относительно друг друга на 120

градусов, и пилообразный сигнал, частота которого гораздо больше частоты синусоид. Принцип работы ШИМ заключается в сравнении синусоиды с пилообразным сигналом и выдачей 0 либо 1, в зависимости от того, находится ли синусоида выше пилообразного сигнала в определенный момент времени или нет.

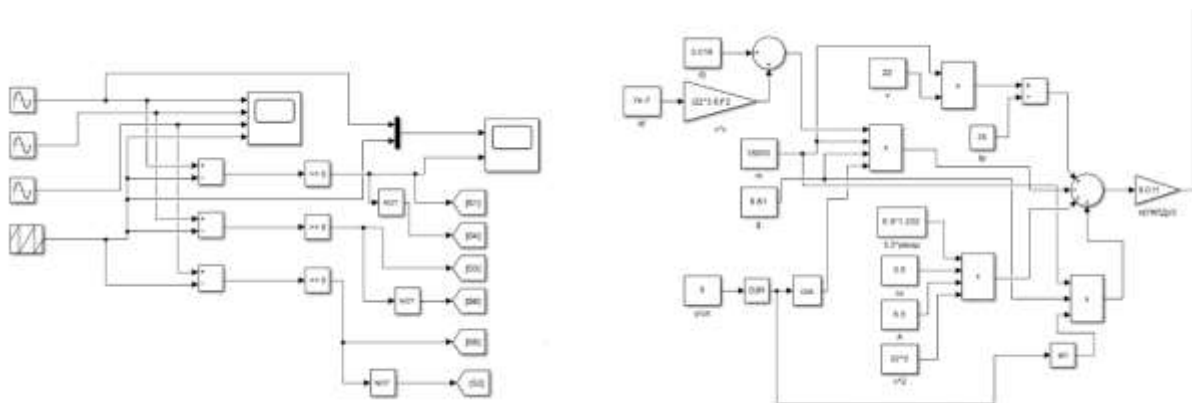


Рис. 2. Модель ШИМ и нагрузки

Далее необходимо подать сигналы с ШИМ на инвертор напряжения (рис. 3). Так как нужно иметь фазное напряжение 380 В для питания электродвигателя, то в источнике постоянного напряжения задается 1074 В. Это следует из формулы:

$$U_{\phi} = \frac{U_d}{2\sqrt{2}}.$$

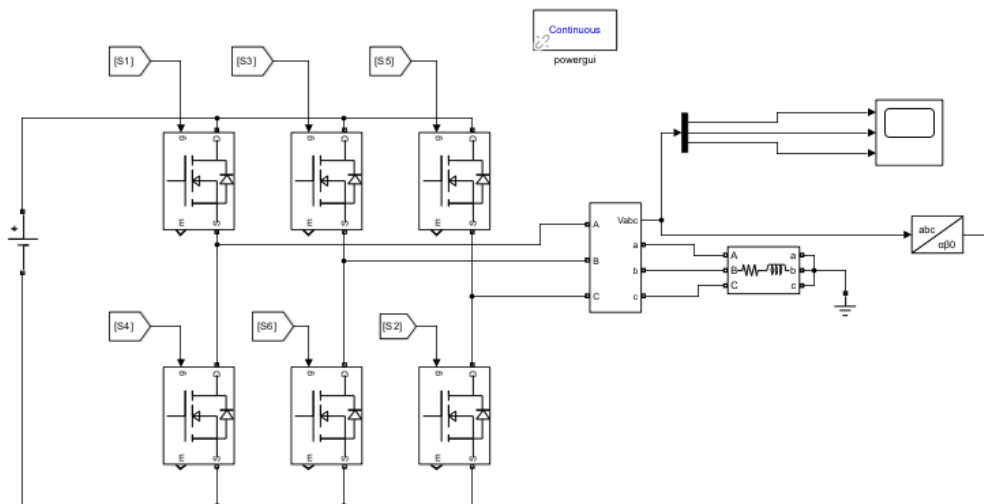


Рис. 3. Инвертор напряжения

Осциллограммы тока статора и скорости вращения двигателя при разных углах наклона дороги представлены соответственно на рис. 4-5. Нагрузка подается на асинхронный двигатель спустя 1,6 с.

На рисунке 2 справа представлена модель нагрузки, основанная на формуле 1.1. Таким образом, изменяя определенные параметры – угол наклона дороги, массу – можно проследить изменения тока статора и скорости вращения двигателя. Также следует

отметить, что на рис. 2 результирующий момент делится 2, что учитывает количество двигателей в электробусе.

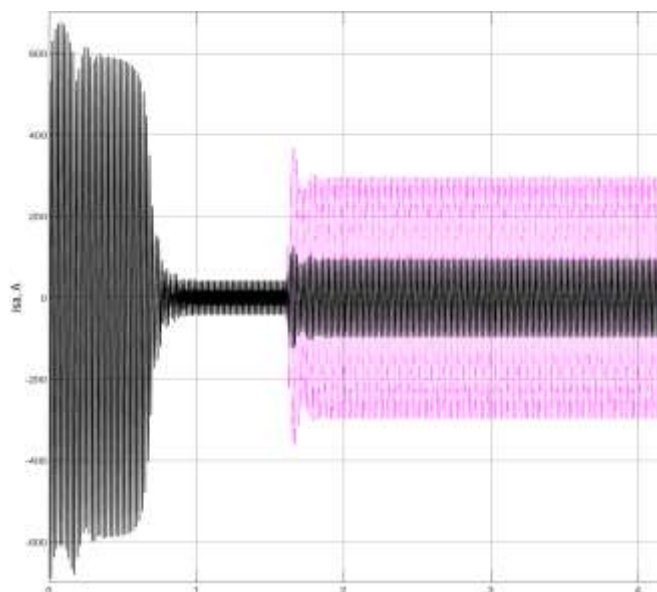


Рис. 4. Осциллограммы тока статора при углах наклона дороги 0° (черная сплошная) и 10° (розовая пунктирная)

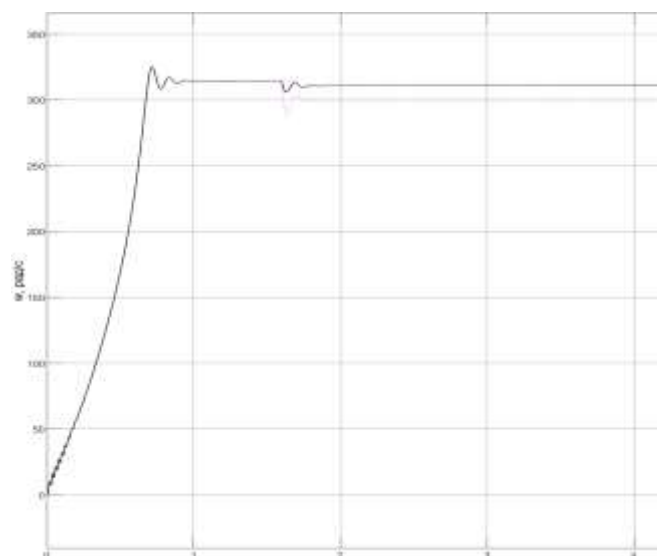


Рис. 5. Осциллограммы скорости при углах наклона дороги 0° (черная сплошная) и 10° (розовая пунктирная)

Список литературы

1. Городской электрический транспорт. Курсовое и дипломное проектирование: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» / В.П. Бойков [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 391 с.; вкл.2. Автор. Название (стиль – «Перечень литературы»).
2. Системы управления электроприводами: учебно-методическое пособие / К. К. Ершов, В. И. Королёв, О. А. Кундюков. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 60 с.

ОТРАБОТКА СКАЧКООБРАЗНОГО ИЗМЕНЕНИЯ УСТАВКИ В СИСТЕМАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

КУЧЕРЯВЫЙ А.И.1,2, УХОВ А.А.1

1Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

2«НПП «Адвент»

Аннотация. В статье рассмотрен практический подход к позиционированию двигателя в режиме прямого привода, позволяющий использовать один ПИД-регулятор, настроенный на жёсткое удержание положения, для отработки скачков уставки. Предложен дополнительный блок дробления уставки, который активируется при смене задания, разбивает его изменение на малые шаги и последовательно подаёт их на вход регулятора. Величина шага определяет скорость изменения уставки, что даёт возможность задавать время разгона, торможения и максимальную скорость вращения ротора. Алгоритм реализован на экспериментальном стенде, приведены экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность подхода.

Ключевые слова: прямой привод, позиционирование, ПИД-регулятор, дробление уставки, задатчик интенсивности, ошибка слежения, торможение по пути, экспериментальный стенд

Задача позиционирования двигателей в режиме прямого привода встречается повсеместно: от бытовой техники до высокоточных станков. Удержание положения ротора является классической задачей теории автоматического управления. Наряду с удержанием, не менее важна задача изменения положения. Обеспечить высокое качество решения обеих задач с помощью одного обычного ПИД-регулятора зачастую невозможно. Причина кроется в разной природе возникновения ошибки: при удержании она появляется из-за внешних факторов среды, меняющих нагрузку на привод, а при изменении положения – из-за смены уставки.

Таким образом, возникает противоречие: регулятор, настроенный на максимально быстрое устранение ошибки удержания (подавление внешних возмущений), при ступенчатом изменении уставки может привести к опасному перерегулированию и механическому повреждению системы. И наоборот, регулятор, обеспечивающий плавное и безопасное изменение положения, не сможет обеспечить достаточную жесткость при удержании позиции под нагрузкой.

Существует несколько подходов к решению этой проблемы:

- использование схемы из двух регуляторов, в которой один отвечает за отработку внешних возмущений, а другой – за отработку изменения уставки;
- введение дополнительных модификаций в структуру регулятора, например, динамическое ограничение его выходного сигнала или интегральной составляющей в момент изменения уставки;
- дробление скачка уставки: формирование плавной траектории перехода, при которой одномоментный большой скачок ошибки заменяется последовательностью малых приращений, корректно отрабатываемых штатным регулятором.

Автором на практике был рассмотрен третий из описанных подходов. Для его реализации в систему регулирования, где ПИД-регулятор настроен на удержание положения, был введён дополнительный блок – блок дробления уставки. Он активируется при изменении уставки, фиксирует её новое значение, глобальное, дробит разницу между предыдущей уставкой и новой на малые шаги и постепенно подаёт их на вход ПИД-регулятора. Новое приращение поступает на регулятор каждый цикл регулирования, что по сути представляет собой скорость изменения уставки (dx/dt). Величина этого шага

определяет скорость вращения ротора, а задание её максимального значения – предельную скорость. Плавно изменяя приращение от нуля до этого максимума, можно обеспечить разгон без рывков. Аналогично организуется и торможение. В реализованной системе можно задать время разгона, время торможения и максимальную скорость изменения уставки, рис. 1.

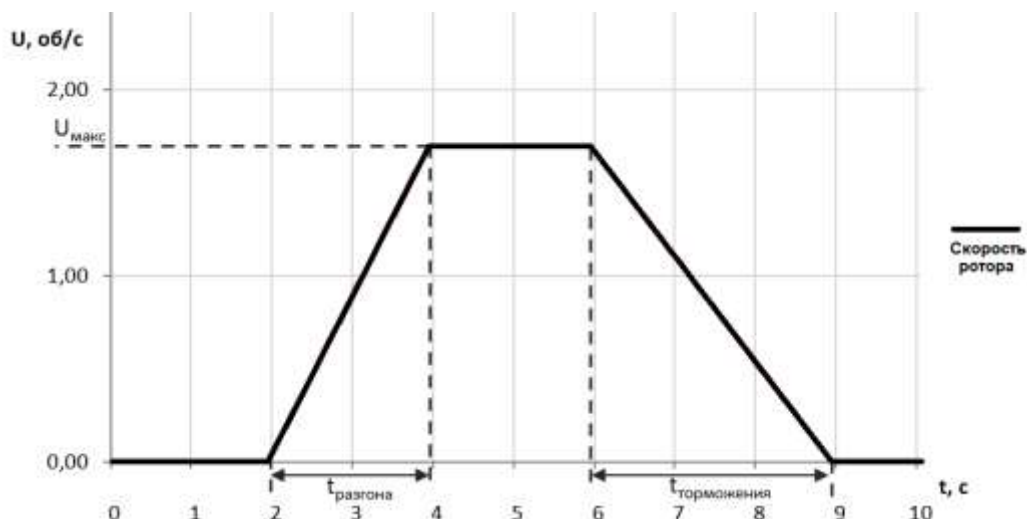


Рис. 1. Трапецевидный профиль движения привода

При этом возникает потребность в определении момента, когда необходимо начать торможение, чтобы при завершении работы блока дробления уставки и нормальной работе ПИД-регулятора конечное положение оказалось максимально близко к глобальной уставке. Для этого на каждой итерации работы блока дробления уставки вычисляется путь, необходимый для торможения. Таким образом, блок дробления продолжает увеличивать приращение уставки либо до достижения максимально заданного приращения, либо до того момента, пока текущая глобальная ошибка не станет меньше или равна пути, требуемому для торможения, в зависимости от того, что наступит раньше. Алгоритм работы представлен на рис. 2.

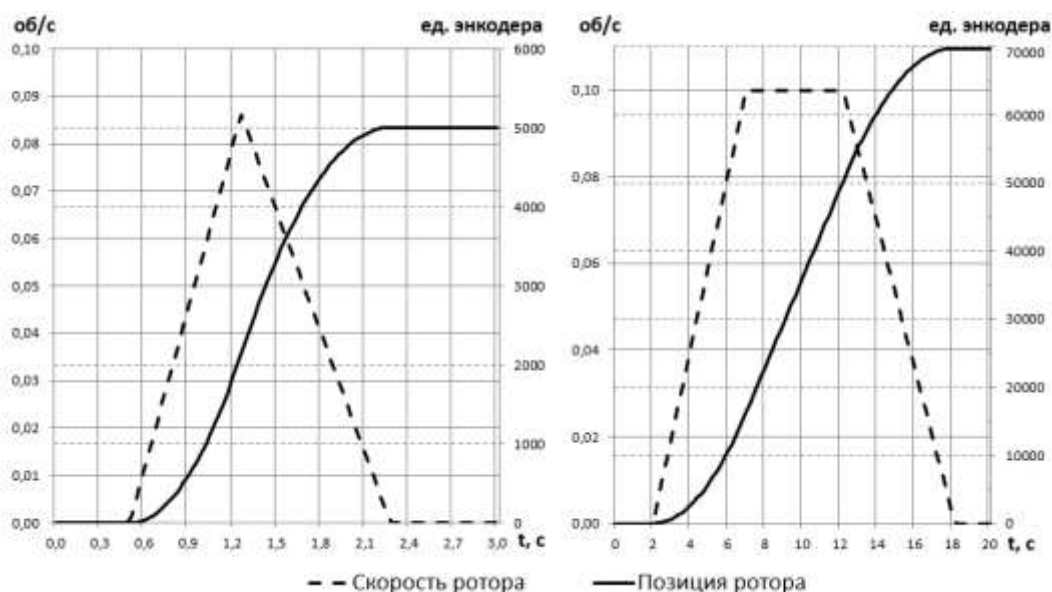


Рис. 2. Алгоритм работы блока дробления уставки: два сценария перемещения

Также в систему введено пороговое значение глобальной ошибки, при котором происходит отключение блока дробления. Это пороговое значение – величина, при которой ПИД-регулятор уже отлично справляется с ошибкой и без дополнительного блока дробления.

После реализации алгоритма на стенде был изучено, насколько сильно реальное положение ротора отличается от заданного блоком дробления уставки в процессе перемещения. Было проведено несколько экспериментов с разными настройками П-звена регулятора. На рисунке 3 приведены две пары графиков «уставка — реальное положение ротора» при разных коэффициентах П-звена. Перемещения выполнялись на одинаковую величину — 10 000 единиц 16-битного энкодера, при периоде регулирования $dt = 1/6000$ с. В лучшем из вариантов средняя по модулю ошибка составила 52 единицы энкодера, а максимальная — 99 единиц, что соответствует 17 угловым минутам в среднем и 32,6 угловым минутам в максимуме соответственно.

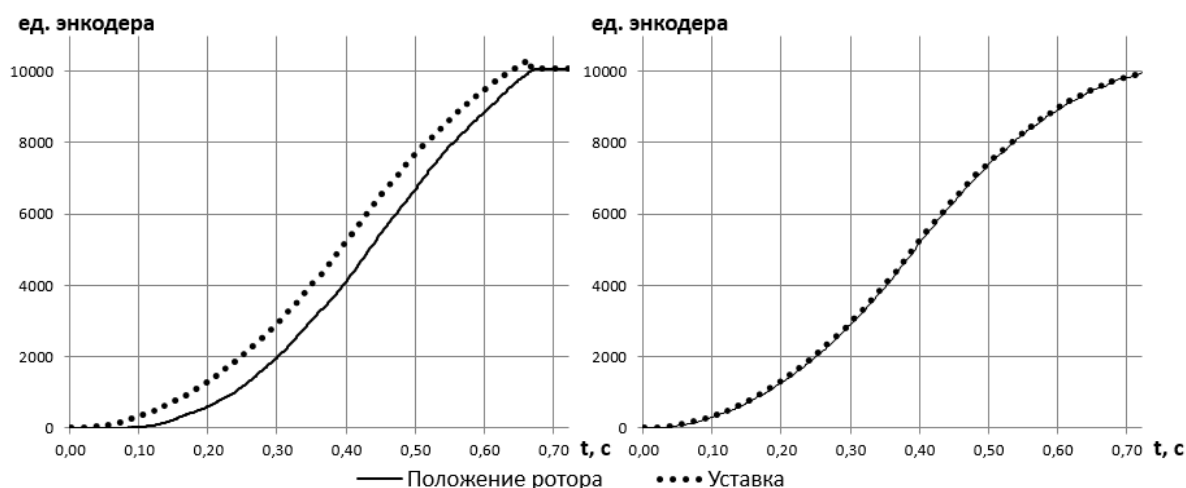


Рис. 3. Ошибка следования в двух экспериментах с различной настройкой П-звена

Блок дробления уставки теоретически позволяет оценить качество работы ПИД-регулятора и помочь в выборе его оптимальных коэффициентов.

В работе предложен и экспериментально проверен способ отработки скачкообразных изменений уставки в системах позиционирования с прямым приводом, использующих единый ПИД-регулятор, настроенный на жёсткое удержание положения. Введение дополнительного блока дробления уставки позволяет обойти противоречие между качеством подавления внешних возмущений и безопасным изменением уставки без модификации самого регулятора.

Список литературы

1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б.И. Копылова. М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
2. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd ed. London: Imperial College Press, 2009. 608 p.
3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. 2007. № 4. С. 66–74.
4. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. 2003. Vol. 13, No. 4. P. 291–309.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПАКЕТА ANSYS C САПР

Руденко К.А.1, Ишин В.В.1

1Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В работе рассматриваются возможности интеграции современных система автоматизированного проектирования с программным комплексом ANSYS Mechanical APDL. Выполнен анализ особенностей импорта геометрических моделей, созданных в AutoCad, SolidWorks и КОМПАС-3D, а также особенности различных форматов данных передачи геометрии. Проведено сравнение результатов расчетов численного моделирования моделей, созданных непосредственно в ANSYS и в различных САПР. По этим результатам были определены наиболее эффективные подходы по моделированию.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, ANSYS, интеграция САПР

Введение

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) и инженерного анализа играют важную роль в разработке технических устройств и электрооборудования. Использование САПР значительно ускоряет проектирование и разработку, а также повышает точность построения и упрощает подготовку данных к численному расчету.

Актуальность работы заключается в исследовании возможностей интеграции популярных САПР со средой ANSYS при решении инженерных задач. Часто модели создаются в сторонних САПР, таких как AutoCad, SolidWorks, КОМПАС-3D, для подготовки чертежей или для передачи заказчику самой модели. Эти модели можно передать в ANSYS путем импорта различных форматов, но при этом могут возникать проблемы, например потеря элементов или искажение формы. Так целью этой работы стало исследование различных САПР с интеграцией в среду ANSYS и сравнением результатов расчетов моделей, созданных различными способами. Основными исследуемыми параметрами стали: особенности импорта геометрии, точность результатов численного анализа, а также особенности форматов данных.

Постановка задачи

Для исследования была создана одна и та же модель непосредственно в ANSYS в пакете Mechanical APDL, а также в системах проектирования AutoCad, SolidWorks и КОМПАС-3D, сама модель представлена на рисунке 1. Полученные модели импортировались из САПР в ANSYS. Полученные результаты сравнивались между собой по ряду параметров: корректность импорта геометрии, качество построения сетки, точность расчета. Конечным итогом расчета было распределение температуры по поверхности заготовки. То есть на индуктор подавался ток и проводился электромагнитный расчет распределения джоулева тепла в заготовке, на основе данных этого расчета проводился тепловой расчет, дающий распределение температуры.

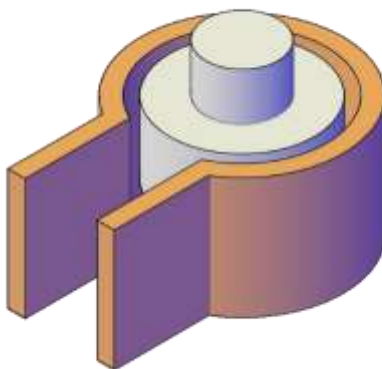


Рис. 1. Модель для построения

Расчет проводился с использованием метода конечных элементов. Данный метод позволяет исследовать распределение температур, напряжений электромагнитных полей и других физических величин в сложных системах.

Индукционный нагрев

Индукционный нагрев – это метод бесконтактного нагрева проводящих материалов за счет воздействия переменного электромагнитного поля.

Индукционный нагрев основан на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока через индуктор возникает переменное магнитное поле, индуцируются вихревые токи в нагреваемом объекте. Тепло в проводящем материале выделяется вследствие нагрева этого материала по закону Джоуля-Ленца.

Одной из особенностей такого вида нагрева является поверхностный характер распределения токов на высоких частотах, такое явление называется скин-эффектом.

Методика исследования и полученные результаты

На первом этапе была разработана геометрия модели непосредственно в ANSYS Mechanical APDL и был выполнен расчет. Результаты этого расчета были приняты в качестве эталона.

После подобные модели были созданы в САПР и экспортировались в различные поддерживаемые форматы. После импорта проводились стандартные действия для проведения расчета детали, при этом параметры задавались полностью одинаковые для всех созданных моделей.

В ходе анализа данных было установлено, что различные форматы передачи данных могут сильно влиять на корректность импорта модели. Из всех использованных форматов IGES оказался самым нестабильным, так как мог терять некоторые плоскости геометрии и попытки воссоздания этой плоскости вручную в ANSYS не приводили к успеху создания объемной детали. Формат данных ACIS был стабильным, но приводил к изломам на боковой поверхности цилиндров, однако при построении сетки это никак не сказывалось на результате. Формат Parasolid показал хорошее качество переноса геометрии, но не поддерживался AutoCad.

Самым явным отличием между импортом и прямым построением в ANSYS оказалась параметризация геометрии и более явное разбиение на части. При прямом построении через код языка APDL можно разбивать геометрию на части тем самым локально менять

параметры сетки. При построении сетки для более корректных результатов приоритетной считается гексагональная сетка, но ее построение имеет ряд ограничений, которые можно частично устранить путем построения дополнительной геометрии. Такой метод построения эффективен только при создании геометрии модели только в ANSYS, поэтому при импорте из различных САПР часто может возникнуть ситуация с тем, что гексагональную сетку построить попросту невозможно.

После построения сетки дальнейшие действия практически не отличаются.

Результаты расчетов также отличались, однако это вполне можно связать с отличием построения сетки. Так как наиболее точная сетка получается при построении в самом ANSYS.

Вывод

Таким образом была исследована возможность интеграции современных САПР со средой ANSYS. Формат передачи данных ACIS оказался универсальным для всех САПР, но давал искажения трехмерной модели, формат Parasolid давал наилучшую совместимость, однако поддерживался всеми исследованными САПР. Точность расчета при этом будет зависеть по большей мере от разбиения сетки.

Построение геометрии давало преимущество в том, что позволяло менять данные геометрии в одном месте, где проводится расчет. Но при очень сложной геометрии разработка модели занимает многократно большее время относительно создания той же модели в САПР.

В ходе анализа полученных результатов был сделан такой вывод, что при расчете сложной геометрии детали геометрию можно импортировать в форматах ACIS или Parasolid. Но для получения высокой точности расчета для отдельных участков деталей можно сначала импортировать геометрию из САПР, сделать предварительные расчеты и выявить места, где требуется высокая точность, а где требования к точности не высоки. Впоследствии подобную геометрию можно сделать непосредственно инструментами ANSYS и, так как уже будут известны требования к точности, подстраивать модель под эти требования. Так, например, в местах, где не требуется большой точности, можно игнорировать некоторые элементы модели, например фаски, скругления, отверстия, либо вообще исследовать только часть детали (если остальная ее часть в рассматриваемом физическом процессе фактически не участвует), что значительно облегчит построение геометрии.

Список литературы

1. Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor / В.П. Большаков, А. Л. Бочков. - Санкт-Петербург : Питер, 2013. - 304 с. : ил.
2. ANSYS. Справочник пользователя / Басов К. А. – М.: ДМК Пресс. – 640 с., ил.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛАБОРАТОРИИ САНИТАРНОГО КОНТРОЛЯ

Соколов М.К.1, Королев В.В.1, Королева А.В.2

1СПбГУПТД, Высшая школа технологии и энергетики

2КГАУ, Институт «Казанская академия ветеринарной медицины имени Н.Э.Баумана»

Аннотация. Система вентиляции лаборатории санитарного контроля предназначена для обеспечения кондиционирования воздуха. Асинхронный двигатель является основным элементом электроприводной

системы, которая осуществляет процесс вентиляции и кондиционирования. В данной статье рассматривается проект модернизации электропривода с целью улучшения его технических характеристик.

Ключевые слова: электропривод, моделирование, лаборатория санитарного контроля, асинхронный двигатель

Лаборатория санитарного контроля — специализированное учреждение, обеспечивающее мониторинг и оценку санитарно-эпидемиологического состояния объектов, среды и продукции. Её деятельность направлена на защиту здоровья населения и профилактику заболеваний.

Лаборатория работает с разнообразными объектами, включая: питьевую воду и сточные воды; пищевые продукты и сырьё; воздух закрытых помещений и атмосферный воздух; почву и донные отложения водоёмов; поверхности оборудования, мебели, стен, полов; спецодежду и средства индивидуальной защиты; медицинские изделия и расходные материалы; отходы производства и потребления.

Одним из требований, предъявляемых к таким лабораториям является требование поддержания микроклимата в помещении для проведения исследований. Поэтому проект модернизации системы вентиляции в лаборатории является актуальной задачей.

В здании лаборатории используется приточно-вытяжная система вентиляции, выполненная вентиляционными каналами внутри стен из кирпичных материалов. В помещениях предусмотрена вентиляция с механическим побуждением, подача воздуха осуществляется через воздухораспределительные решетки.

Параметры электрического привода вентиляционной установки сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры вентиляционной установки

Параметр, единица измерения	Значение
Номинальная мощность, Р, кВт	22
Коэффициент полезного действия,	0,83
Рабочая частота, f , Гц	50
Количество оборотов, n , мин ⁻¹	1000/980
Степень защиты IP	44
Рабочее напряжение	220/380
Номинальный ток, I_n , А	44,8

Разработка проекта началась с проведения аэродинамического расчета, который позволил определить потери давления и рассчитать необходимый расход воздуха для лаборатории. Необходимый расход воздуха составляет 660 м³/час при давлении 390 Па, а потери давления 60 Па.

Для приточной системы был выбран электродвигатель АИР71В2 с небольшим запасом мощности. А для его управления – преобразователь частоты VL-D20-1R5G-S2.

Структурная схема математической модели асинхронного двигателя с рассчитанными параметрами схемы замещения представлена на рисунке 1, а результаты моделирования на рисунке 2.

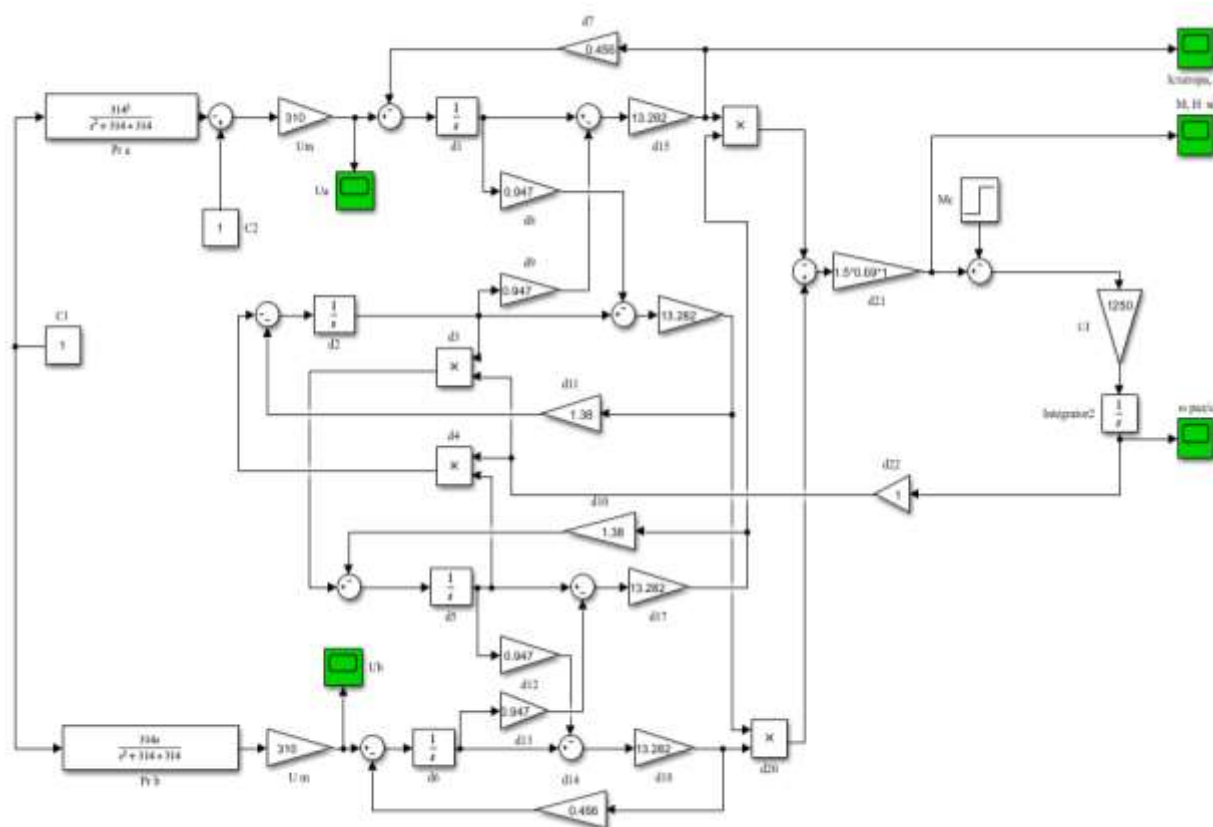


Рис. 1. Схема математической модели электродвигателя АИР71В2

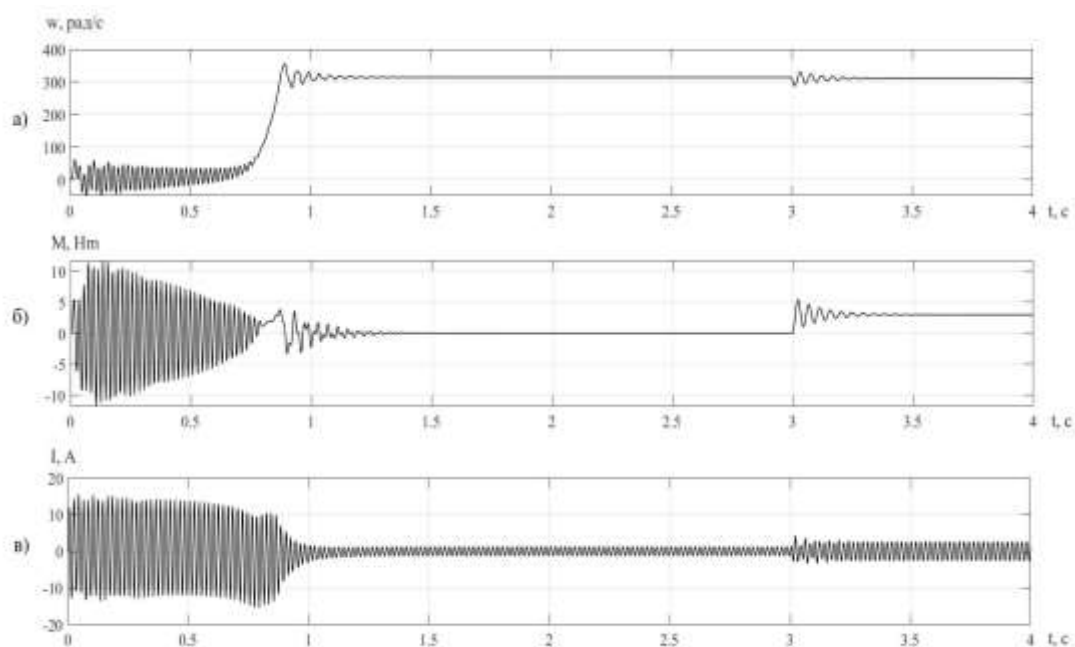


Рис. 2. Скорость электродвигателя, момент и ток фазы статора

На графиках видно, что скорость электродвигателя выходит на номинальную за 1,5 сек, а на 3 секунде после получения возмущающего воздействия от нагрузки уменьшается до 298 рад/с. Момент двигателя при этом возрастает до номинального 3,74 Нм, а ток статора до 2,6А.

Структурная схема преобразователя частоты с вентиляторной нагрузкой представлена на рисунке 3.

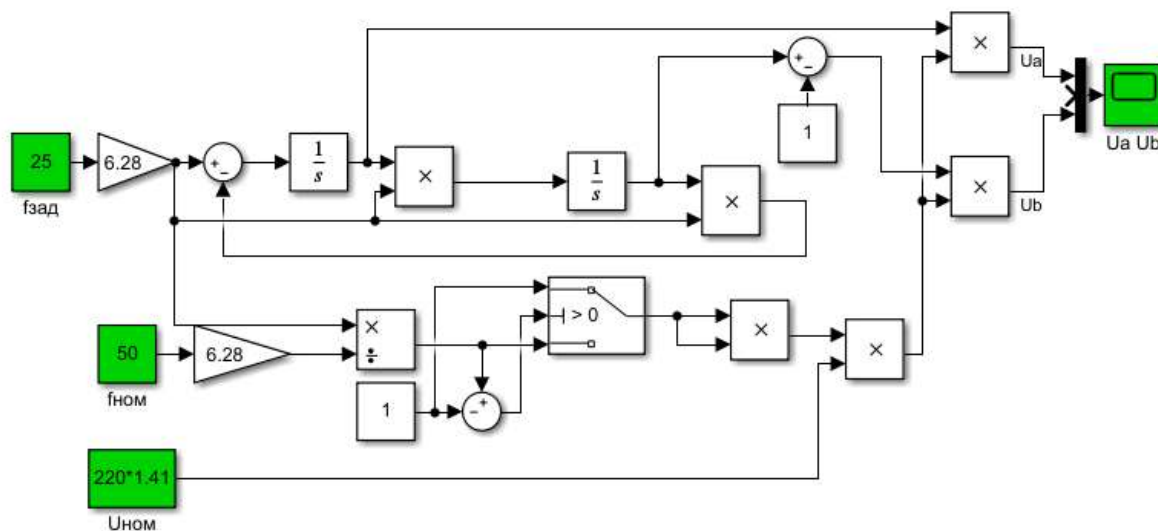


Рис. 3. Структурная схема преобразователя частоты

Далее был выбран тормозной резистор, который выполняет функцию поглощения энергии при торможении электродвигателя и преобразовании ее в тепло, а также рассчитаны задатчик интенсивности и интегральный регулятор. Задатчик интенсивности обеспечивает плавное движение при разгоне и торможении привода.

Для построения модели осевого вентилятора была рассчитана аэродинамическая характеристика выбранного вентилятора, а затем построена структурная схема вентилятора, представленная на рисунке 4.

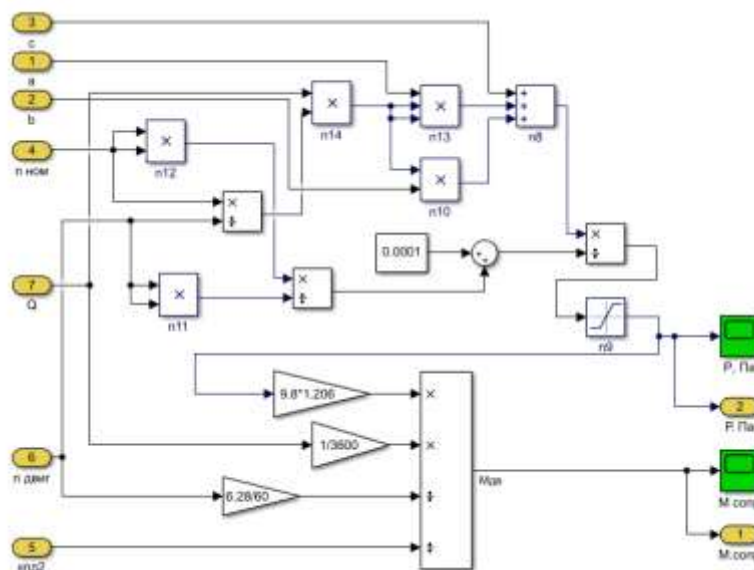


Рис. 4. Структурная схема вентилятора

Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

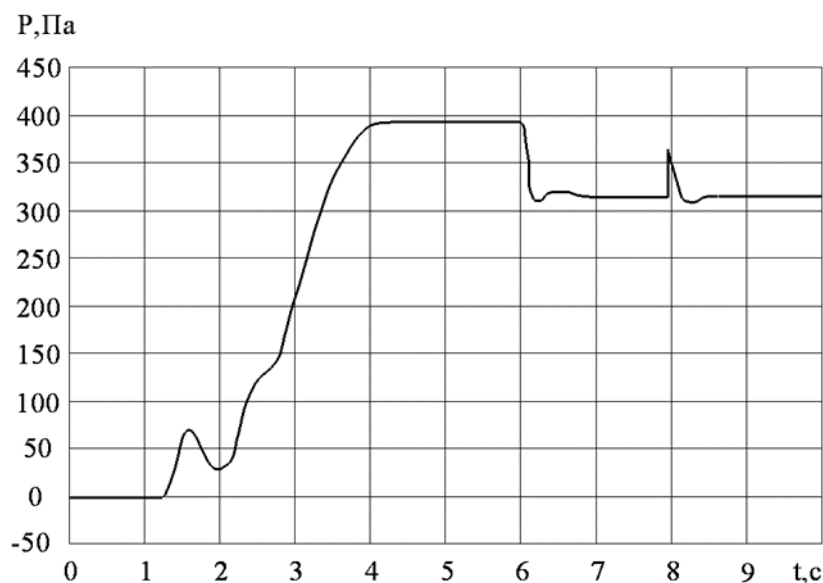


Рис. 5. Характеристика давления

Из графика видно, что при задании номинальных значений расхода воздуха, скорости осевого вентилятора система устанавливается в номинальный режим через 4 секунды, на 6 секунде система отработала возмущающее воздействие по расходу воздуха.

Таким образом, была разработана замкнутая система автоматического регулирования расхода воздуха для лаборатории санитарного контроля.

Дальнейшим этапом стал выбор оборудования цепи управления, а именно выбор логического контроллера, блока питания, датчика расхода воздушных масс и коммутационных аппаратов защиты электрооборудования.

Список литературы

1. Системы управления электроприводами: учебно-методическое пособие / К. К. Ершов, В. И. Королёв, О. А. Кундюков. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 60 с.
2. Мансуров Р. Ш. Вентиляция. Аэродинамический расчет вентиляционных систем с механическим побуждением: методические указания/ Р. Ш. Мансуров. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2015. 34 с

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

СОКОЛОВА У.Ю.1, СОКЛАКОВА М.В.1

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Выполнен анализ проблем функционирования релейной защиты и автоматики (РЗА) при интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в систему электропередачи. Показано, что инверторные ВИЭ имеют ограниченный и программно-задаваемый ток короткого замыкания (КЗ), подавляют симметричные составляющие, что делает неработоспособными традиционные защиты такие как максимальная токовая защита (МТЗ), дифференциальная защита (ДЗ), токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП). Предложено применение дифференциальной защиты линии (ДЗЛ) с использованием токов прямой и обратной последовательностей. Для разветвлённых сетей рекомендована логика высокочастотного отключения. Представлена имитационная модель гибридной ветро-солнечной электростанции и анализ её выходных характеристик.

Ключевые слова: релейная защита, возобновляемые источники энергии, инверторная генерация, ток короткого замыкания, дифференциальная защита линии, селективность

Массовое внедрение различных типов электростанций, преобразующих энергию солнца, ветра и других, с инверторным преобразованием энергии изменяет режимы работы электрических сетей [1]. В частности, изменяются токи короткого замыкания и их направление, что ставит под угрозу селективность и чувствительность классической релейной защиты. Цель данной работы — выявить ключевые проблемы существующих защит в сетях с ВИЭ и предложить технически обоснованные пути их решения.

Современные ветровые и солнечные электростанции осуществляют выдачу мощности в сеть посредством инверторных преобразователей [2]. Ключевые технические особенности инверторных ВИЭ включают: стохастический и резко-переменный характер выработки; детерминированность отклика на аварию алгоритмом системы управления; неспособность выдавать ток короткого замыкания, существенно превышающий номинальный. Это делает классические токовые защиты нечувствительными, поскольку их уставки рассчитаны на значительно большие токи, которые выдают традиционные генераторы [2].

На рисунках 1-3 представлены упрощенные схемы, иллюстрирующие изменение режимов работы распределительной сети при подключении возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В начале каждой линии условно показан генератор, обеспечивающий основное питание, который работает на некоторых видах топлива. Через сопротивления R_1 и R_2 , которые моделируют параметры линий электропередачи, энергия поступает к нагрузке (по стрелке вправо). На рис. 3 в схему также включено устройство автоматического повторного включения (АПВ). Параллельно к сети подключен блок ВИЭ, содержащий символические изображения ветряной установки и солнечной панели [3].

Присоединение ВИЭ в качестве дополнительного источника энергии приводит к системным нарушениям в работе РЗА. Величина тока короткого замыкания зависит от типа ВИЭ: синхронные генераторы малых гидроэлектростанций (ГЭС) дают 5-6-кратное усиление тока, тогда как инверторные фотоэлектрические установки увеличивают лишь в 1,1–2,0 раза (рис. 1). Этого недостаточно для срабатывания максимальных токовых защит. Кроме того, возникает двунаправленный характер токов КЗ на питающих линиях, из-за чего ненаправленные МТЗ теряют селективность (рис. 2). Устройства АПВ также в этом случае работают некорректно: подпитка места повреждения от инвертора поддерживает дугу в паузе АПВ (рис. 3) [3].

Анализ применимости различных видов защит показал, что:

- дифференциально-фазная защита (ДФЗ) теряет работоспособность из-за подавления инверторами токов обратной последовательности;
- направленная высокочастотная защита (НВЧЗ) также не работоспособна в классическом исполнении;
- МТЗ и ТЗНП неприменимы из-за низкого уровня тока КЗ;
- точность дистанционной защиты снижается из-за искажения токов и напряжений в переходных процессах [3].

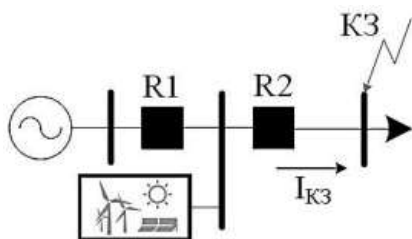


Рис. 1. Влияние ВИЭ на чувствительность защиты

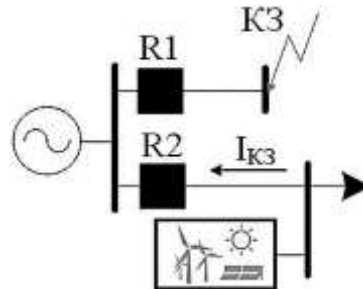


Рис. 2. Влияние ВИЭ на селективность защиты

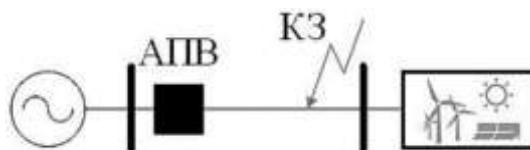


Рис. 3. Проблемы с АПВ при подключении ВИЭ

Наиболее эффективным решением для линий с ВИЭ является дифференциальная защита линии. Она обеспечивает абсолютную селективность за счёт непрерывного сравнения векторных сумм токов на концах линии. При внутреннем КЗ основной вклад в дифференциальный ток вносит мощная энергосистема, что обеспечивает надёжное срабатывание даже при ограниченном токе со стороны инвертора. Для повышения надёжности рекомендуется использовать не пофазное сравнение, а сравнение токов прямой и обратной последовательностей [4].

Для разветвлённых линий, связывающих питающую подстанцию и подстанцию с ВИЭ, разработана специальная логика высокочастотного отключения. При коротком замыкании в зоне направленной защиты на питающей подстанции формируется разрешающий сигнал. Если от подстанции с ВИЭ не поступает блокирующий сигнал от реле направления мощности обратной последовательности, производится отключение линии с обоих концов [4].

Для исследования совместной работы разнородных ВИЭ была разработана имитационная модель гибридной электростанции, включающей ветроэнергетическую установку и фотоэлектрические панели (рис. 4). Комбинирование генерации на основе ветра и солнца позволяет снизить зависимость суммарной выработки энергии от погодных условий за счёт эффекта взаимной компенсации: в периоды низкой инсоляции энергия в основном поступает от ветровых установок, а при недостатке ветровой активности в основном от солнечных панелей.

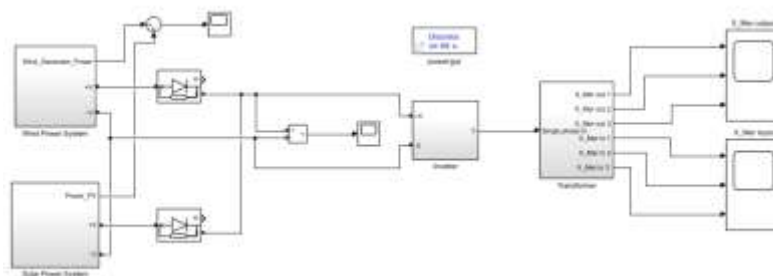


Рис. 4. Модель ветро-солнечной электростанции

На рис. 5 представлен график суммарной выходной мощности смоделированной гибридной установки в течение суточного цикла. Анализ графика показывает, что результирующая мощность характеризуется меньшей амплитудой колебаний по сравнению с выработкой каждого из источников в отдельности. Такое сглаживание выходного графика способствует снижению динамических нагрузок на сетевое оборудование и уменьшению числа кратковременных бросков мощности, что положительно сказывается на режимах работы присоединённых потребителей.

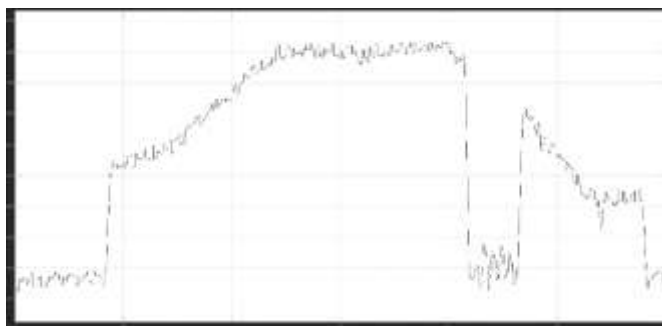


Рис. 5. Выходная мощность совмещенной модели

Представленная имитационная модель гибридной ветро-солнечной электростанции демонстрирует возможность сглаживания суточного графика выработки, что способствует снижению динамических нагрузок на сетевое оборудование. Технические особенности инверторных ВИЭ (ограниченный ток КЗ, программно-задаваемый отклик на аварию, подавление симметричных составляющих) приводят к снижению эффективности или полной неработоспособности традиционных защит (МТЗ, ДЗ, ТЗНП, ДФЗ, НВЧЗ). Наиболее эффективным решением для линий с ВИЭ является применение дифференциальной защиты линии с использованием токов прямой и обратной последовательностей. Для сложных разветвлённых сетей требуются гибридные решения с организацией каналов обмена данными между подстанциями. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области адаптации устройств РЗА к энергосистемам с высокой долей возобновляемой генерации.

Список литературы

1. Мирзоева С.М., Мирзоев Р.К., Мустафаева Ф.М. Риски, возникающие при подключении возобновляемых источников энергии к энергосистеме // Вестник науки. № 1(82). Т. 2. 2025. С. 1359–1365.
2. Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2023» / Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. Чебоксары, 2023. 169 с.
3. Андреев М.В., Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Киевец А.В., Рудник В.Е. Исследование влияния возобновляемых источников энергии на функционирование релейной защиты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». — 2019. — Т. 19, № 3. — С. 93–99.
4. Ефремов В.А., Ефремов А.В., Таныгин С.А., Смирнов С.Ю. Применение устройств РЗА для линий электропередачи с возобновляемыми источниками // Сборник научных трудов молодых ученых ТПУ. Энергетика. Томск: ТПУ, 2022. С. 43–49.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕЧЕЙ ИПХТ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ РАСПЛАВА СТЕКЛА

Солдатов Н.С.1, Лопух Д.Б.1, Скриган И.Н.1

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В статье приведено описание методики расчета производительности печей индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) цилиндрической формы с охватывающими индукторами с учетом неравномерности распределения температуры на поверхности ванны расплава стекла при остекловывании высокоактивных отходов (ВАО). Методика основана на использовании результатов 2D численного моделирования при решении электрогидродинамических (ЭГД) задач в индукционных системах с разными значениями диаметров ванн расплава и экспериментальных данных по удельной производительности синтеза стекла при иммобилизации жидких ВАО. Впервые показано значительное влияние размеров печей ИПХТ на их удельную поверхностную производительность и определены предельные параметры их проектирования.

Ключевые слова: индукционная плавка, холодный тигель, остекловывание, радиоактивные отходы, стекло, моделирование, электрогидродинамические эффекты

Введение

Одной из важнейших характеристик печей ИПХТ является их производительность, а при использовании крупномасштабных печей особое значение приобретает удельная поверхностная производительность, которая зависит не только от максимальной температуры расплава на поверхности ванны, но, и от нагрева её центральной области. Падение температуры расплава в центральной области ванны приводит не только к снижению производительности процесса, но и может приводить к затвердеванию или кристаллизации расплава, что ухудшает качество плавленного материала. Особенно это важно при остекловывании ВАО [1], где одновременно необходимо обеспечение требуемой производительности печи и химической стойкости стекла при последующем захоронении с целью изоляции радиотоксичных элементов от окружающей среды [2].

Требование увеличения производительности печей ИПХТ с увеличением диаметра холодного тигля приводит к необходимости снижения частоты тока [1, 2] для повышения глубины проникновения тока в ванну расплава с целью лучшего нагрева центральной области ванны расплава стекла. В настоящее время для остекловывания ВАО используются и разработаны печи ИПХТ с охватывающими индукторами с диаметрами холодных тиглей до 0,63 м при частоте тока 0,44 МГц [3]. Однако, современные требования к повышению производительности печей приводят к необходимости использования печей большего диаметра и проведения актуальных исследований таких печей с точки зрения оценки удельной производительности и нагрева центральной области ванны расплава стекла.

Постановка задачи и цель исследования

В оценочных инженерных расчетах удельная поверхностная производительность печи $M_{пл}$ считается постоянной по всей свободной поверхности ванны расплава стекла. Однако, температура на поверхности ванны расплава распределена неравномерно с падением к центру ванны, особенно для печей большой мощности с большим диаметром при варке стёкол, расплавы которых обладают повышенной вязкостью и низкой способностью передачи тепла конвективными течениями. Предлагаемая методика предусматривает учет данной неравномерности с корректировкой значения общей производительности печи. Важным допущением в рассматриваемой методике при определении распределения

температуры на свободной поверхности ванны является предположение, что тепловой поток от неё сопоставим с тепловым потоком в шихту на поверхности ванны расплава при остекловывании жидких радиоактивных отходов.

Целью исследования является разработка методики расчета производительности печей ИПХТ с учетом распределения температуры на поверхности ванны расплава при остекловывании ВАО и определение предельных параметров проектирования печей.

Методика расчета

При оценочных расчетах производительности печей остекловывания, как правило, руководствуются значением удельной производительности $M_{пл}'$, полученной эмпирически для максимальной температуры свободной поверхности ванны расплава. В реальных условиях варки стекла, температура на поверхности ванны расплава распределена неравномерно, поэтому, для каждого участка расплава на поверхности ванны должно быть своё значение $M_{пл}'$. На рис. 1, в качестве примера, представлен график зависимости удельной производительности остекловывания модельных жидких ВАО $M_{пл}'$ от температуры на поверхности расплава в диапазоне 1000 – 1300 °С, приближенный к экспериментальным данным.

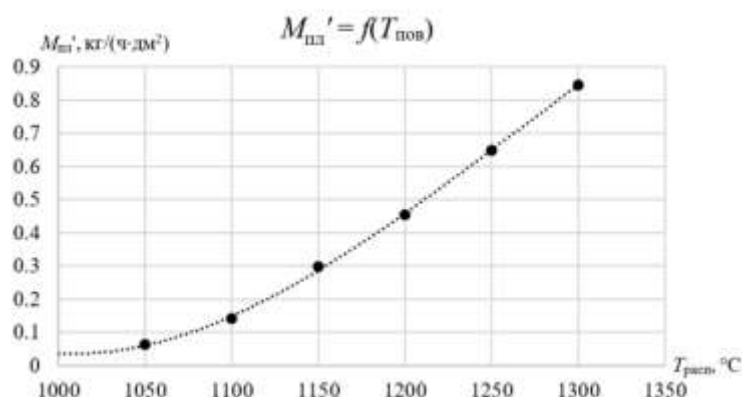


Рис. 1. График зависимости удельной производительности от температуры расплава

Таблица 1
Зависимость $M_{пл}' = f(T_{пл})$

$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$M_{пл}', \text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{дм}^2)$
1050	0.062
1100	0.140
1150	0.297
1200	0.454
1250	0.650
1300	0.846

Результаты 2D ЭГД численных расчетов по распределению температуры и конвективных потоков расплава в ваннах различных индукционных систем ИПХТ без учета холодного тигля при высоте ванны расплава $A_2=300$ мм представлены на рис. 2.

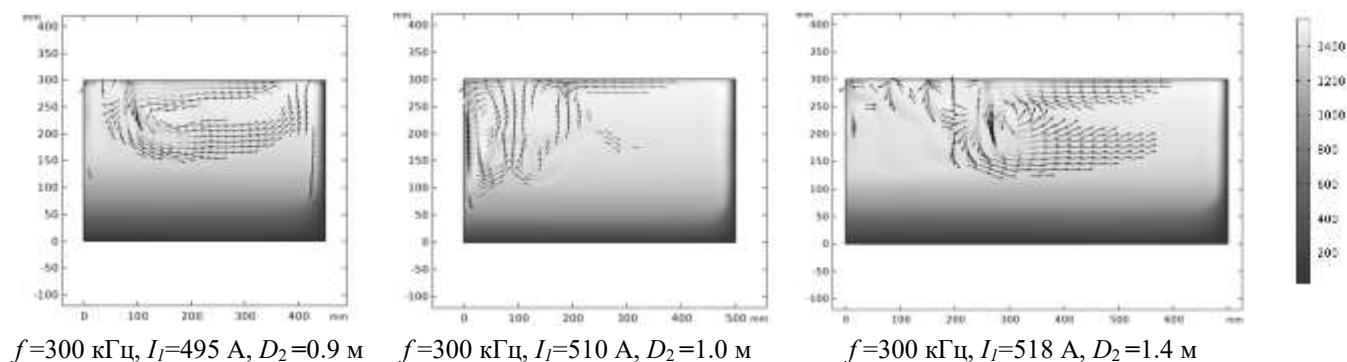


Рис. 2. Распределение температуры и скоростей движения расплава в ваннах различных индукционных систем, [°C]

Из рис. 2 видно, что с увеличением диаметра ванны D_2 более 1 метра, центральная зона ванны расплава стекла хуже снабжается горячими потоками расплава, что обуславливает снижение температуры расплава к оси ванны.

В качестве примера, вычисление $M_{пл}'$ выполнено с использованием следующих исходных данных: частота тока $f = 300$ кГц; ток индуктора $I_1 = 495$ А; диаметр ванны расплава стекла $D_2 = 0.9$ м; высота ванны расплава $A_2 = 300$ мм; внутренний диаметр двухвиткового индуктора $D_1 = 1.1$ м; высота индуктора $A_1 = 300$ мм. Значения температуры поверхности ванны расплава, полученного при моделировании, представлены графиком рис. 3.

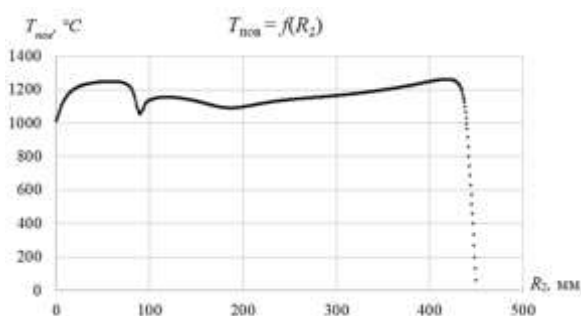


Рис. 3. Распределение температуры на свободной поверхности ванны расплава

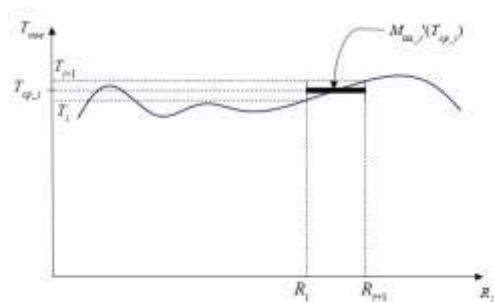


Рис. 4. К определению $M_{пл}'$ для каждого температурного участка

Среди данных температурных точек для расчета производительности были выбраны только те значения, которые превышают 1000 °С. Для точек с меньшей температурой удельная производительность принимается ничтожно малой. Далее, график делится на равные отрезки согласно количеству выбранных точек, в данном случае на $n = 750$ отрезков. Для i -го отрезка считается средняя температура $T_{cp,i}$ которой в соответствии с графиком на рисунке 1 соответствует удельная производительность (рис. 4).

Следует отметить, что расчет приводится для двумерной модели, то есть предполагается, что температурное распределение обладает осевой симметрией и каждый i -ый отрезок характеризует i -ое кольцо с одинаковой температурой. Таким образом, формируются n кольцевых поверхностей со своей температурой поверхности $T_{пов,i}$ и $M_{пл}'$ (рис. 5).

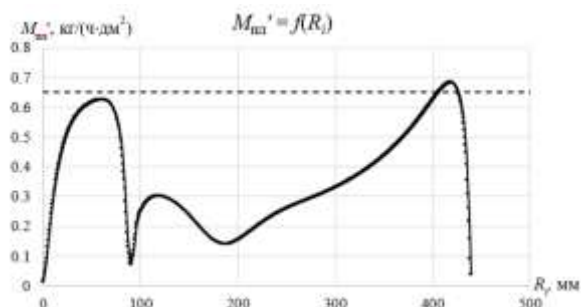


Рис. 5. Распределение M_{melt}' по радиусу ванны расплава стекла

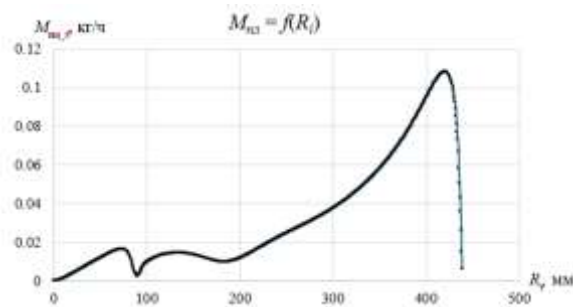


Рис. 6. График изменения производительности по радиусу ванны расплава стекла

На основании графика удельной производительности строится график производительности по радиусу ванны расплава (рис. 6), который вычисляется по формуле:

$$M_{пл,i} = M_{пл}' \cdot S_i = M_{пл}' \cdot \pi \cdot (R_{i+1}^2 - R_i^2)$$

Просуммировав полученную для каждой кольцевой поверхности производительность можно получить производительность всей печи:

$$M_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{пл}_i} = 23.7 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Для сравнения печей между собой целесообразнее применять $\bar{M}'_{\text{пл}}$:

$$\bar{M}'_{\text{пл}} = M_{\text{пл}} / S_{\text{пов}}$$

Методика так же применена к вариантам печей с другими размерами и параметрами (см. рис. 2). Полученные значения удельной и полной производительности печей сведены в таблицу 2. Для сравнения параметров печей значения $M_{\text{пл}}$ приведены к значению $\bar{M}'_{\text{пл}_1250^\circ\text{C}} = 0.65 \frac{\text{кг}}{\text{ч} \cdot \text{дм}^2}$, которое характерно для постоянной температуры поверхности ванны расплава $T_{\text{пов}} = 1250^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Сравнение производительности печей

Параметр	300 кГц, 495 А, 0.9 м	300 кГц, 510 А, 1.0 м	300 кГц, 518 А, 1.4 м
$M_{\text{пл}}, \text{кг/ч}$	23.70	30.57	45.35
$S_{\text{пов}}, \text{дм}^2$	63.62	78.35	153.94
$\bar{M}'_{\text{пл}}, \frac{\text{кг}}{\text{ч} \cdot \text{дм}^2}$	0.3698	0.3856	0.2887
$\bar{M}'_{\text{пл}_1250^\circ\text{C}} / \bar{M}'_{\text{пл}}$	1.7577	1.6857	2.2515
$T_{\text{пов_макс}}, ^\circ\text{C}$	1260	1266	1236

Заключение

Результаты, полученные по разработанной методике, и сравнение данных в таблице 2 показывают, что:

- учет неравномерности распределения температуры расплава стекла на свободной поверхности ванны может приводить к снижению удельной производительности крупномасштабных печей ИПХТ в 2,6 – 3,5 раза и это необходимо учитывать при проектировании печей на заданную производительность;
- увеличение диаметра ванны расплава стекла, с точки зрения тепловой эффективности, целесообразно до 1 метра, после которого значение $M_{\text{пл}}$ падает.

Необходимо так же отметить, что учет трехмерных эффектов конвективного перемешивания в ванне расплава однозначно приведет к уменьшению тепло-массопереноса расплавом в центральную область ванны и усугублению рассматриваемых негативных эффектов.

Список литературы

1. Лопух Д. Б. Разработка технологии и оборудования для отверждения имитаторов радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодных тиглях: дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. Ленинград, 1987.
2. Д. Б. Лопух, С. В. Бешта, А. П. Мартынов, А. В. Вавилов, И. Н. Скриган. Индукционная плавка кориума и варка стекла в холодном тигле. Свойства и моделирование. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.

З. Скриган И. Н. Экспериментальные и численные исследования для разработки промышленной печи остекловывания высокоактивных отходов индукционной плавкой в холодном тигле: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб, 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫМИ СИСТЕМАМИ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Сюй В.1, Юань Ю.1

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В статье исследуется задача адаптивного управления мультиагентными системами с неизвестными параметрами. Для преодоления трудностей, связанных с наличием неизвестных физических возмущений в крупномасштабных группах агентов, построен энергетический функционал, включающий пространственные состояния и ошибки оценивания параметров. Разработаны распределённый закон управления и адаптивный закон обновления параметров. Доказаны асимптотическая сходимость состояний замкнутой системы и диссипация энергии. Предложенный метод обеспечивает надёжный подход к кооперативному управлению крупномасштабными группами агентов при наличии параметрической неопределённости.

Ключевые слова: мультиагентные системы, дифференциальные уравнения в частных производных, неизвестные параметры, адаптивное управление

Введение

Мультиагентные системы (МАС) представляют значительный интерес для решения прикладных инженерных задач, таких как групповое управление БПЛА и координация распределённых электромеханических объектов [1]. Традиционные методы дискретного моделирования на основе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) при увеличении числа агентов сталкиваются с фундаментальным ограничением, известным как «проклятие размерности» [2]. В связи с этим все большее внимание исследователей привлекает подход к моделированию крупномасштабных МАС с использованием дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) параболического типа [3].

Однако в условиях реальной эксплуатации такие физические параметры, как аэродинамическое сопротивление, внешние возмущения и нелинейное трение, как правило, не могут быть определены с высокой точностью. В системах с распределёнными параметрами существующие методы адаптивного управления, разработанные для МАС на базе ОДУ, сложно напрямую распространить на бесконечномерные системы. При этом специализированные исследования в области адаптивного кооперативного управления МАС, описываемых параболическими ДУЧП, на текущий момент остаются крайне немногочисленными [4].

Для решения вышеуказанных проблем в данной работе исследуется задача адаптивного согласованного управления мультиагентными системами, описываемыми параболическими ДУЧП, при наличии неизвестных параметров.

Математическая модель системы и постановка задачи

Рассмотрим крупномасштабную МАС, распределённую в одномерной ограниченной пространственной области $x \in [0, L]$. Пусть $y(x, t)$ — состояние системы в точке x в момент времени t . В данной работе рассматривается следующее ДУЧП параболического типа с неизвестными параметрами:

$$y_t(x, t) = \alpha y_{xx}(x, t) + \theta \phi(y(x, t)) + u(x, t), x \in [0, L], t > 0 \quad (1)$$

где $\alpha > 0$ — известный коэффициент диффузии, $u(x, t)$ — синтезируемое распределенное управляющее воздействие, $\theta \in \mathbb{R}$ — неизвестный постоянный параметр, а $\phi(\cdot)$ — известная нелинейная функция.

Для последующего анализа устойчивости полагаем, что система удовлетворяет однородным граничным условиям Дирихле:

$$y(0, t) = 0, y(L, t) = 0, t \geq 0 \quad (2)$$

Начальное условие задается в виде:

$$y(x, 0) = y_0(x), x \in [0, L].$$

Цель управления в данной работе формулируется следующим образом: для системы с неизвестным параметром θ необходимо разработать закон распределенного управления $u(x, t)$ и закон оценки параметров $\hat{\theta}(t)$, обеспечивающие асимптотическую устойчивость состояния замкнутой системы $y(x, t)$, то есть выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y(\cdot, t)\|_{L^2(0, L)} = 0$.

Ошибка оценки неизвестного параметра определяется как:

$$\tilde{\theta}(t) = \theta - \hat{\theta}(t),$$

где $\hat{\theta}(t)$ — оценка параметра θ , получаемая в режиме реального времени.

Синтез адаптивного регулятора и анализ устойчивости

Для обеспечения асимптотической устойчивости системы (1) сконструируем функционал Ляпунова в следующем виде:

$$V(t) = \frac{1}{2} \int_0^L y^2(x, t) dx + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^2(t)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент адаптации.

Дифференцируя $V(t)$ по времени t , имеем:

$$\dot{V}(t) = \int_0^L y(x, t) y_t(x, t) dx - \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}(t) \dot{\tilde{\theta}}(t) \quad (3)$$

Подставляя уравнение динамики системы (1) в выражение (3), получим:

$$\dot{V}(t) = \int_0^L y(x, t) [\alpha y_{xx}(x, t) + \theta \phi(y) + u(x, t)] dx - \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}(t) \dot{\tilde{\theta}}(t)$$

Далее, используя метод интегрирования по частям для слагаемого со второй производной по пространственной координате и учитывая граничные условия (2), находим:

$$\int_0^L y(x, t) y_{xx}(x, t) dx = [y(x, t) y_x(x, t)]_0^L - \int_0^L y_x^2(x, t) dx = - \int_0^L y_x^2(x, t) dx$$

Подставляя выражение $\theta = \hat{\theta}(t) + \tilde{\theta}(t)$ в $\dot{V}(t)$ и перегруппировывая слагаемые, можно выделить часть, содержащую известные оценки, и часть, зависящую от ошибки оценки параметров:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -\alpha \int_0^L y_x^2(x, t) dx + \int_0^L y(x, t) [\hat{\theta}(t) \phi(y) + u(x, t)] dx \\ & + \tilde{\theta}(t) \left[\int_0^L y(x, t) \phi(y) dx - \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\theta}}(t) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

В целях обеспечения диссипации энергии системы необходимо исключить неопределенное слагаемое $\tilde{\theta}(t)$ в выражении (4) и гарантировать отрицательную

определенность оставшихся членов. Сформулируем распределенный закон управления в виде:

$$u(x, t) = -cy(x, t) - \hat{\theta}(t)\phi(y(x, t)) \quad (5)$$

где $c > 0$ — коэффициент усиления обратной связи.

В то же время выберем адаптивный закон обновления параметров следующим образом:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \gamma \int_0^L y(x, t)\phi(y(x, t))dx \quad (6)$$

Подставляя уравнения (5) и (6) в выражение (4), получим:

$$\dot{V}(t) = -\alpha \int_0^L y_x^2(x, t)dx - c \int_0^L y^2(x, t)dx$$

Учитывая, что $\alpha > 0$ и $c > 0$, имеем

$$\dot{V}(t) \leq 0$$

На основании леммы Барбалата можно заключить, что при $t \rightarrow \infty$ состояние $y(x, t) \rightarrow 0$. Таким образом, асимптотическая устойчивость замкнутой системы доказана.

Анализ результатов моделирования

Для подтверждения эффективности предложенного в данной работе метода адаптивного управления МАС с неизвестными параметрами в данном разделе проведено численное моделирование в среде MATLAB.

На рис. 1 представлена эволюция состояния системы $y(x, t)$ в пространственно-временной области. Результаты моделирования подтверждают, что предложенная стратегия управления способна эффективно компенсировать нелинейную динамику и обеспечивать глобальную асимптотическую устойчивость состояний крупномасштабной групповой системы.

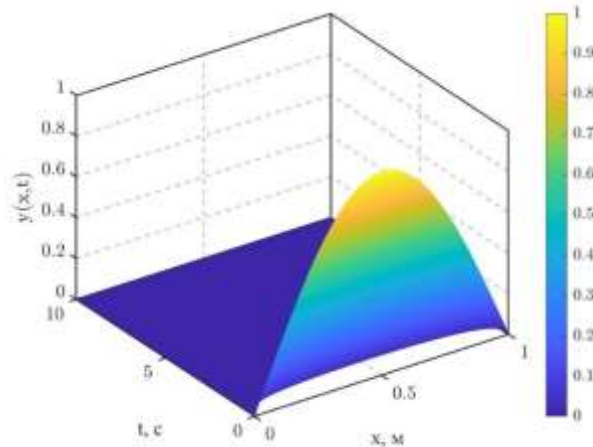


Рис. 1. Пространственно-временная эволюция состояния системы $y(x, t)$

На рис. 2 представлены траектории изменения оценок неизвестных параметров $\hat{\theta}(t)$. Полученные результаты подтверждают высокую робастность предложенного в данной работе метода, который обеспечивает устойчивое кооперативное управление системой даже в условиях отсутствия априорной информации об истинных значениях параметров окружающей среды.

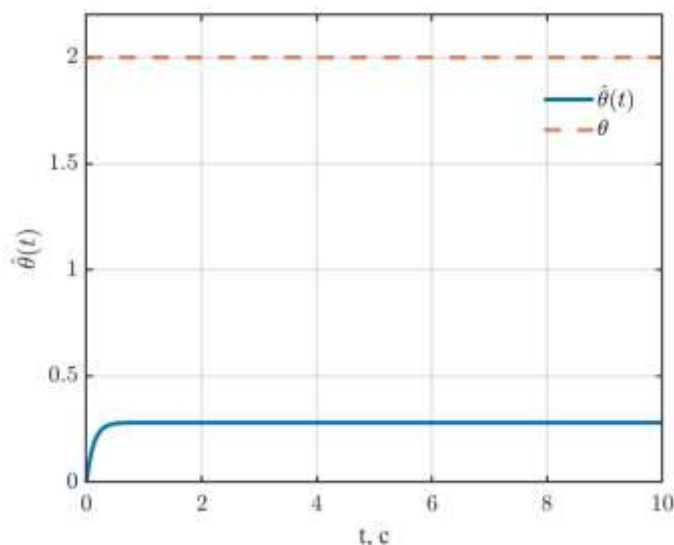


Рис. 2. Адаптивные траектории эволюции $\hat{\theta}(t)$

Заключение

В данной работе для МАС параболического типа, описываемых ДУЧП с неизвестными параметрами, разработаны распределенные законы управления и адаптивные законы обновления параметров. Теоретическое обоснование и результаты численного моделирования подтверждают, что предложенный подход позволяет эффективно компенсировать параметрическую неопределенность и гарантирует асимптотическую устойчивость состояния замкнутой системы. Разработанный метод представляет собой надежное решение для организации кооперативного управления в крупномасштабных группировках агентов.

Список литературы

1. Liu Y., Liu J., He Z., Li Z., Zhang Q., Ding Z. A survey of multi-agent systems on distributed formation control // Unmanned Systems. 2024. Vol. 12, No. 5. P. 913–926.
2. Liu Z., Lu Z., Zhao Z., Efe M. O., Hong K. S. Single parameter adaptive neural network control for multi-agent deployment with prescribed tracking performance // Automatica. 2023. Vol. 156. Art. 111207.
3. Zhang S., Tang L., Liu Y. J. Formation deployment control of multi-agent systems modeled with PDE // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. Vol. 19, No. 12. P. 13541–13559.
4. Zhao W., Liu Y., Yao X. PDE-based boundary adaptive consensus control of multiagent systems with input constraints // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2023. Vol. 35, No. 9. P. 12617–12626.

СИСТЕМА АКТИВНОЙ БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

ШУВАЛОВА П.Д.¹, ЛАВРИНОВСКИЙ В.С.¹, МИГРАНОВ Р.М.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В статье рассматриваются две схемы активной балансировки аккумуляторной батареи: на переключаемых конденсаторах и на переключаемом LC-контуре.

Ключевые слова: заряд ячеек, переключаемый конденсатор, переключаемый LC-контур, балансировка, аккумуляторная батарея

Проблема неравномерности заряда ячеек решается активным перераспределением энергии между ними, что позволяет избежать потерь на нагрев, характерных для пассивной балансировки.

В схеме с переключаемым конденсатором цепь балансировки попеременно подключается к более заряженной и к менее заряженной ячейке с частотой, задаваемой системой управления (рис. 1).

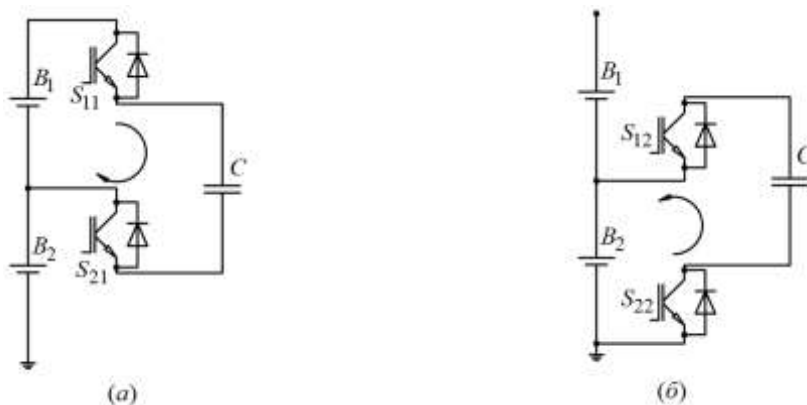


Рис. 1. Система активной балансировки на переключаемом конденсаторе

(а – заряд конденсатора от более заряженной ячейки, б – передача энергии менее заряженной ячейке)

Величина потерь зависит от соотношения постоянной времени RC и периода переключения: при большой частоте переключений ток изменяется скачкообразно, причём пиковый ток превышает средний приблизительно в 6 раз (рис 2); при малой частоте снижается эффективность балансировки, однако соотношение среднего и максимального тока меньше – около 1,6 (таблица 1).

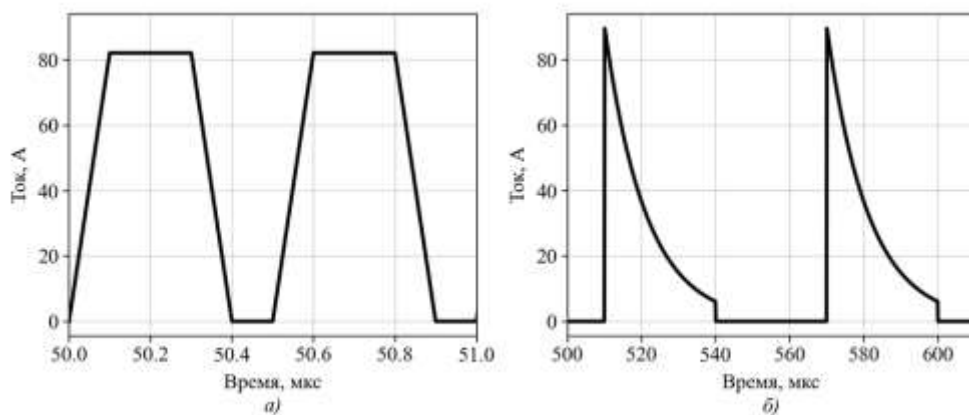


Рис. 2. Скачкообразный ток при переключении

Таблица 1

	Средний ток за период, А	Максимальный ток, А	Соотношение токов
Рисунок а ($T_n \ll RC$)	49,25	80	1,6
Рисунок б ($T_n \gg RC$)	15,55	90	5,94

В схеме с активной балансировкой двух ячеек на переключаемом LC-контуре (рис. 3) индуктивность сглаживает скачки тока при большой частоте переключений и позволяет

настроить цепь в резонанс. Благодаря этому достигается режим zero current switching (ZCS) с минимальными потерями при коммутации.

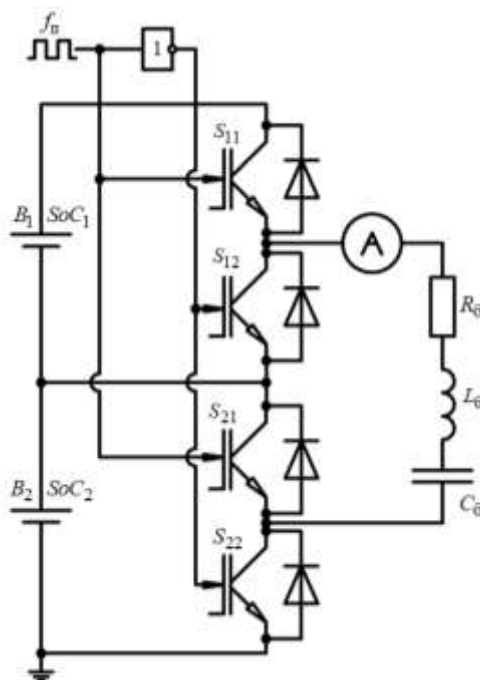


Рис. 3. Система балансировки на переключаемом LC-контуре

Моделирование схем с балансировкой на конденсаторе и на LC-контуре при параметрах $C = 0,01$ мкФ, $R = 100$ Ом, $L = 0,01$ Гн и начальном состоянии заряда 99% и 98% показало: в схеме на LC-контуре ток становится почти синусоидальным вместо острых пиков, форма напряжения меняется незначительно, а время выравнивания заряда сокращается более чем в 2 раза (рис. 4). Кроме того, итоговый уровень заряда ячеек в схеме с индуктивностью оказывается выше, что свидетельствует о меньших энергетических потерях.

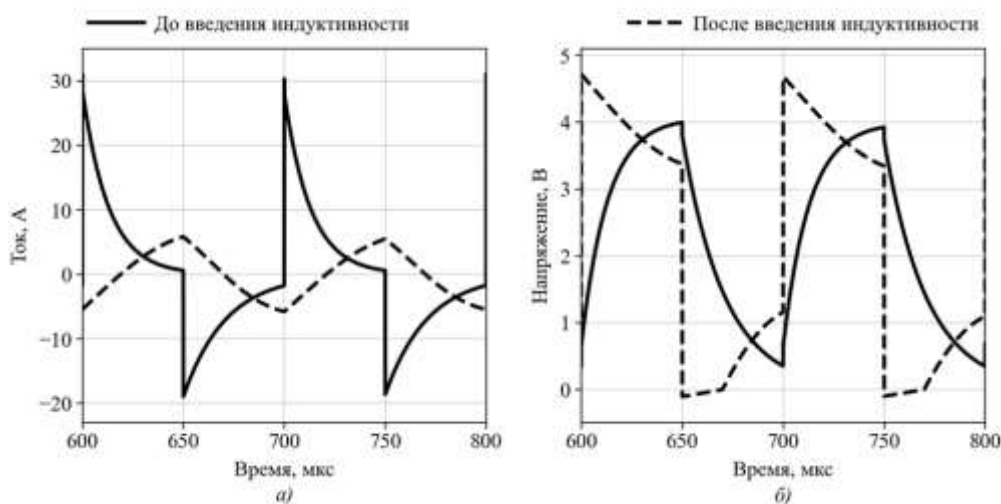


Рис. 4. Форма тока и напряжения при введении индуктивности

Заключение

Таким образом, система на переключаемом LC-контуре превосходит систему на переключаемом конденсаторе по энергоэффективности и скорости балансировки.

Недостатками схемы на LC-контуре являются усложнение системы управления за счёт большего числа тактов в одном цикле балансировки и повышение общей стоимости схемы за счёт введения дополнительного элемента.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ РАБОТЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Якибчук С.Ю.¹, Воробьев А.А.²

^{1,2}*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»*

Аннотация. Проведено исследование работы синхронного генератора с бесщеточной системой возбуждения при переменных оборотах первичного движителя. Сняты нагрузочные и регулировочные характеристики исследуемого генератора. Определены эффективные диапазоны выдаваемой электрической мощности для различных скоростей вращения вала приводного двигателя для скоростей в диапазоне от 600 до 1500 об/мин. Сделаны выводы на предмет возможности использования существующего генерирующего оборудования дизель-генераторных установок в системах генерации с регулируемой скоростью вращения вала.

Ключевые слова: дизель-генератор, регулирование скорости, бесщеточное возбуждение, внешняя характеристика, регулирование возбуждения

Введение

Электроснабжение изолированных энергорайонов в труднодоступной местности осуществляется дизельными электростанциями (ДЭС), что непременно сопряжено с финансовыми издержками определяемыми сложностью логистических процедур дизельного топлива. В свете чего обеспечение эффективных топливных режимов во многом определяет экономические показатели ДЭС. В свете неравномерности графиков нагрузки станции достаточно часто наблюдается работа дизель-генераторных установок (ДГУ) ДЭС в долевых режимах нагрузки, составляющих порядка 30-60% от номинальной мощности ДГУ [1]. Работа дизельного двигателя (ДД) в таких режимах приводит к снижению его моторесурса из-за закоксовывания цилиндров, вызванного неполным сгоранием дизельного топлива. Одним из подходов, способных повысить топливную эффективность ДГУ, а также уменьшить интенсивность износа моторесурса ДД, является перевод ДГУ на работу с регулируемой скоростью вращения (РСВ).

ДГУ с РСВ может быть охарактеризована, как электромашиновентильный комплекс с приводом от ДД [2]. Обеспечение поддержания параметров электроэнергии в соответствии с требованиями к качеству электроэнергии осуществляется за счет использования силового преобразовательного комплекса, выбор состава и параметров которого во многом определяется видом электромеханического преобразователя.

Известны различные решения на базе синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) [3]. Альтернативой использованию СГПМ выступают решения на базе асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором (АГКР) [4]. Определенный интерес представляют также вариации ДГУ с РСВ на базе машины двойного питания (МДП) [5]. Производится разработка решений на базе вентильно-индукторных генераторов (ВИГ) [6].

Каждое из вышеописанных решений обладает своими преимуществами и недостатками, при этом к ним можно отнести и тот, что связан с необходимостью замены существующего генератора на новый, в свою очередь это влечет к необходимости замены

несущей рамы ДГУ, реорганизации системы автоматического регулирования возбуждения, как на программном, так и на аппаратном уровне. Также стоит отметить, что все вышеперечисленные варианты не позволяют осуществлять работу ДГУ с РСВ, в случае потребности, напрямую на сеть, за исключением решений на базе МДП, что является критичным в случае выхода из строя элементов преобразовательного комплекса.

Оптимальным с точки зрения объема капитальных затрат и перечня необходимых для реализации технических мероприятий является использование существующего генератора в составе ДГУ. На сегодняшний день основным видом генераторов, используемых в составе вновь поставляемых ДГУ является синхронный генератор с бесщеточным возбуждением (СГБВ). Данный выбор во многом определяется простотой устройства системы возбуждения не использующей щеточный контакт для питания обмотки возбуждения, а также АРВ способного регулировать в широком диапазоне ток возбуждения при синхронной скорости вращения вала. Однако, при переходе на работу с РСВ, диапазон регулирования значений напряжения на зажимах СГБВ сокращается. Данный аспект становится особенно критичным при выборе параметров преобразовательного комплекса и при оценке возможности модернизации ДГУ в ДГУ с РСВ в целом. В связи с этим становится актуальным вопрос оценки диапазонов выходных напряжений СГБВ при его работе с РСВ.

Описание физической модели

Для проведения исследования была собрана физическая модель ДГУ с РСВ в соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 1. Описание основных параметров оборудования изложено в таблице 1.

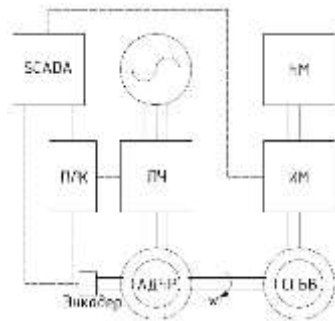


Рис. 1. Функциональная схема физической модели

Таблица 1

Описание и параметры оборудования

Обозначение	Расшифровка	Параметры
СГБВ	Синхронный генератор с бесщеточным возбуждением	Напряжение: 400 В; Номинальная активная мощность: 11 кВт; Синхронная скорость вращения вала: 1500 об/мин
АДЧР	Асинхронный двигатель частотно-регулируемый	Напряжение: 400 В; Номинальная активная мощность: 15 кВт
ПЧ	Преобразователь частоты	
НМ	Нагрузочный RLC модуль	Напряжение: 400 В; Номинальная полная мощность: 30 кВА
ИМ	Измерительный модуль	Диапазон измерения напряжения: 0...400 В; Диапазон измерения частоты: 0...100 Гц
Энкодер	Инкрементальный энкодер	Число импульсов на оборот: 1024

ПЛК	Программируемый логический контроллер	-
SCADA	Система диспетчерского управления и сбора данных	-

Управление физической моделью осуществлено через SCADA, осуществляющую управление коммутацией ступеней НМ, регистрацию значений токов, напряжений, активной и реактивной мощностей по каждой фазе СГБВ посредством использования ИМ. ПЛК осуществляет управление ПЧ, как по команде оператора через SCADA для выбора уставки скоростного режима, так и в функции от сигнала Энкодера с целью поддержания требуемого значения скорости вращения вала АДЧР по мере роста нагрузки, питаемой СГБВ.

Методика испытаний

В рамках исследования была проведена серия из 7 комплексов испытаний, соответствующих следующим значениям скорости вращения вала АДЧР, об/мин: 1500, 1350, 1200, 1050, 900, 750, 600. Для каждого комплекса испытаний был осуществлен отбор комбинаций электрических нагрузок НМ, соответствующий диапазону значений коэффициента мощности нагрузки (КМН) от 0,8 до 1. Для каждого значения нагрузки осуществлено снятие действующих значений фазного напряжения, тока, активной и реактивной мощности для 14-ти значений тока возбуждения от 0,1 до 1,4 А.

Таблица 2

Объем испытаний

Скорость вращения вала, об/мин	1500	1350	1200	1050	900	750	600
Число значений нагрузки	50	135	111	54	110	79	91

Результаты испытаний

На основании зарегистрированных экспериментальных данных сформированы 3-мерные массивы значений фазного напряжения, тока, активной и реактивной мощности. На основании данных массивов произведен расчет фактических значений КМН для каждого значения нагрузки каждого комплекса испытаний. На основании данных осуществлен отбор значений фазного напряжения и тока, соответствующих следующим значениям КМН: 0,8; 0,9; 1. Для указанных значений осуществлено построение внешних и регулировочных характеристик, исследуемого СГБВ. Примеры полученных характеристик для скорости вращения вала 1200 об/мин представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

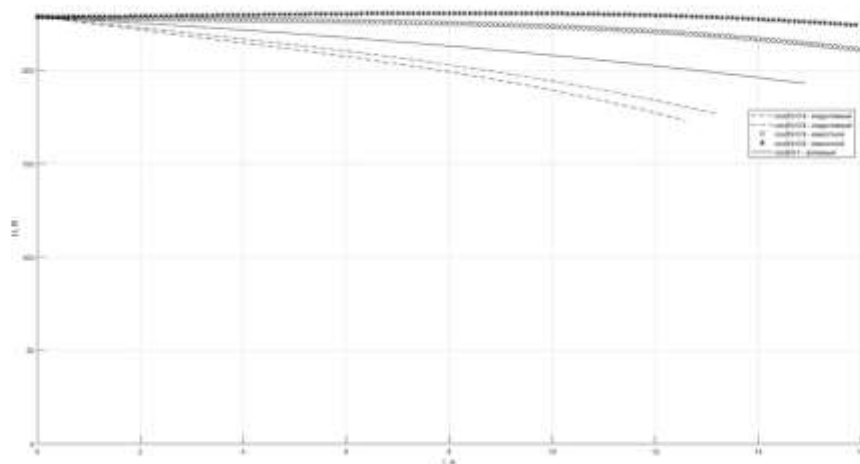


Рис. 2. Внешняя характеристика СГБВ при: скорости вращения вала 1200 об/мин; токе возбуждения 1,4 А

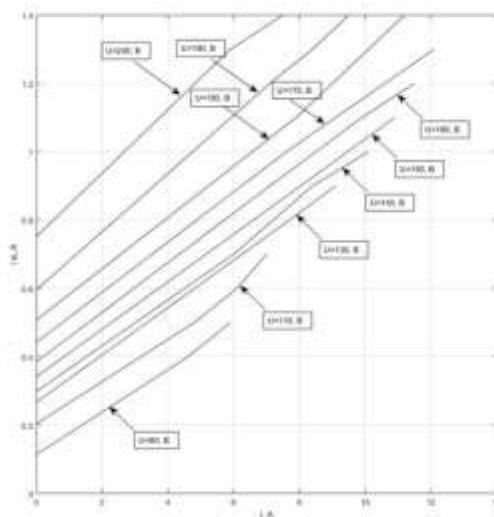


Рис. 3. Регулировочные характеристики СГБВ при: скорости вращения вала 1200 об/мин; КМН 0,8 – индуктивная нагрузка

Заключение

Объем полученных экспериментальных данных может быть использован при анализе работы ДГУ с РСВ на продолжительных временных промежутках в рамках математического моделирования [1]. Применительно к вопросу о применимости комплексов ДГУ с РСВ на базе СГБВ можно отметить необходимость в использовании преобразователей с достаточно широким диапазоном входных значений напряжения. Применительно к данному исследованию диапазон максимально возможных линейных напряжений составил от 140 до 400 В, что как следствие ведет у удорожанию преобразовательной части системы и требует отдельного учета при проведении предпроектной оценки.

Список литературы

1. S. I. Iakibchuk, N. I. Ignatev and R. R. Ganeev, "Diesel Power Plant Fuel Efficiency Under Variable Speed Diesel Generator Integration," 2026 8th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2026, pp. 1-5, doi: 10.1109/REEPE69046.2026.11481436.
2. Шакарян Ю.Г. Системы генерирования на основе электромашиновентильных комплексов // Энергия Единой Сети. – 2021. - №1 (56). – С. 63-71.
3. Barbosa R., Issa M., Silva S., Ilinca A. Variable Speed Diesel Electric Generators: Technologies, Benefits, Limitations, Impact on Greenhouse Gases Emissions and Fuel Efficiency // Journal of Energy and Power Technology. — 2022. — Vol. 4. — No. 1. — P. 1–23. DOI: 10.21926/jept.2201003y
4. Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Билялетдинов Т. З. Оценка топливных показателей электростанций на базе асинхронного генератора переменной частоты вращения / Актуальные проблемы электроэнергетики : Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции, Нижний Новгород, 21 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 143-151. – DOI 10.46960/areen_2023_143. – EDN NFIBOX.
5. Абсаямов Д. Р., Петров А. Ю., Хальметов Р. Р. Повышение показателей энергоэффективности системы электроснабжения наземных комплексов космического назначения путем применения дизель - генераторных установок с переменной частотой вращения // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2022. – № S1(20). – С. 37-45. – EDN VBDJAE.
6. Пантелеев В.И., Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю. Система управления возбуждением вентильно-индукторного генератора в составе дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 505–514. EDN: OYUFYE

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ НА БАЗЕ СЕРИЙНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

ЕЛИСЕЕВ Е.И.¹, ФИЛАТОВ Д.М.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. С развитием автономного движения всё более важной задачей становится разработка автономных систем управления. Одна из особенностей этих систем – возможность лёгкой установки на серийный транспорт. Вторая особенность – возможность быстрого выхода из автономного режима. Установленная система должна иметь интуитивно понятные способы аварийного останова и «перехвата» управления. Также важна неразрывность передачи управляющего воздействия от водителя к автомобилю вне зависимости от режима работы. В данном проекте описывается реализация такой системы на серийном электромобиле Gazelle e-NN.

Ключевые слова: Программируемый логический контроллер, беспилотный транспорт, системы безопасности

Введение

В современном мире всё большую популярность приобретает беспилотный транспорт. В связи с этим, возникает необходимость внедрения беспилотных систем в серийный автомобиль. Нужны системы, удовлетворяющие многим требованиям, а именно: особое строение системы безопасности, высокая надёжность компонентов, широкие температурные диапазоны работы. Важна структура транспортного средства и его «готовность» к переоборудованию в автономную систему. Для решения этих проблем необходимо использовать промышленные контроллеры и блоки, сертифицированные автономные модули и надёжные инженерные решения.

Описание объекта управления

Перед нами стоит задача разработать систему автономного движения серийного электромобиля Gazelle e-NN (Рисунок 1). Основные габаритные размеры [1] указаны на рисунке 2. В качестве тягового электродвигателя используется электрический синхронный на постоянных магнитах мощностью 100 кВт. Тяговая аккумуляторная батарея имеет рабочее напряжение 346 В и ёмкость 48 кВт·ч. В рулевой системе установлен гидроусилитель.



Рисунок 1. Gazelle e-NN



Рисунок 2. Габаритные размеры

Особенности

Цель любой системы автономного движения – обеспечить максимальную точность выполнения команд при максимальном быстродействии. Для этого необходимо помимо разработки высокоуровневых интеллектуальных алгоритмов движения реализовать низкоуровневое взаимодействие с транспортным средством. Также нужно разработать системы безопасности и аварийного выхода из автономного режима. Важно использовать отказоустойчивые решения. Поэтому в качестве блока управления взят ПЛК, а для передачи управляющих воздействий используются промышленные серводвигатели. Структурная схема системы приведена на рисунке 3.

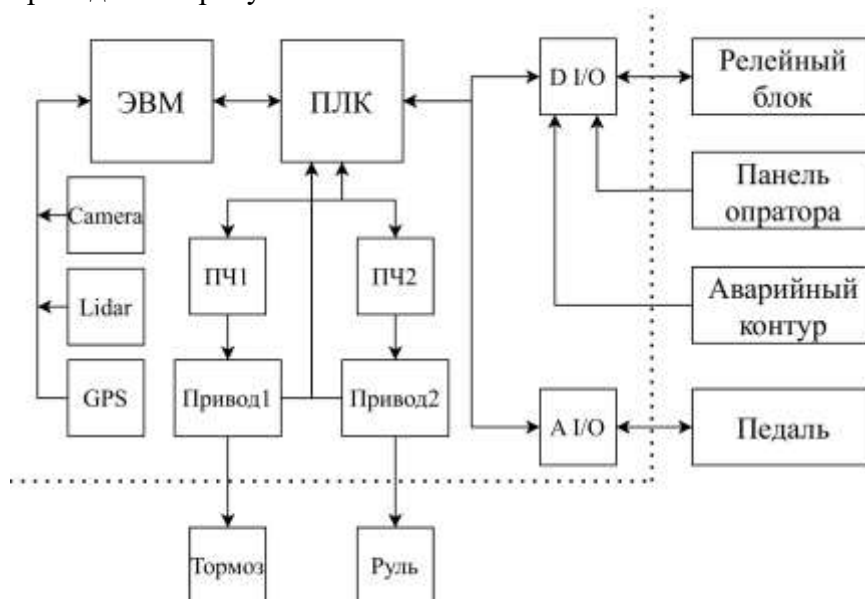


Рисунок 3. Структурная схема системы

Важное условие нашей системы – возможность быстрого демонтажа и неразрывность основных органов управления. Так как при серьёзных неисправностях автономной системы водитель должен иметь возможность взять управление на себя, все стандартные органы управления должны функционировать вне зависимости от состояния системы автономного движения.

Управляющие воздействия подаются на рулевое колесо и на педали газа и тормоза. Рассмотрим системы управления скоростью и направлением.

Система задания скорости

В автомобилях с автоматической коробкой передач присутствуют два органа управления скоростью: педаль газа и педаль тормоза. В нашем автомобиле педаль газа является электронной аналоговой.

Для эмуляции нажатия на педаль газа используем двухканальный ЦАП, управляемый по Modbus. Установим ЦАП через нормально замкнутое реле. Также с помощью блока АЦП будем контролировать текущее положение педали газа. Это необходимо для передачи управления водителю.

Так как педаль тормоза физически связана с вакуумным усилителем, то управляющее воздействие будем передавать с помощью электропривода и тросика. Мощность электропривода рассчитана с большим запасом для гарантированного нажатия на педаль. Для обеспечения «перехвата» управления установим тензометрический датчик на поверхность педали.

Для разработки структуры регулятора создадим математическую модель. При разработке стоит учесть, что электромобиль имеет систему рекуперации электроэнергии при торможении, которая активируется в определённой области положений педали газа (зона В, рисунок 4). Также при отпущенной педали в режимах движения автомобиль разгоняется до 5 км/ч. Так как для получения точных динамических параметров транспортного средства необходимо особое оборудование, была построена качественная математическая модель, на которой планируется выбрать оптимальное строение регуляторов. А дальнейший подбор коэффициентов будет осуществляться экспериментально. Математическая модель автомобиля представлена на рисунке 5.

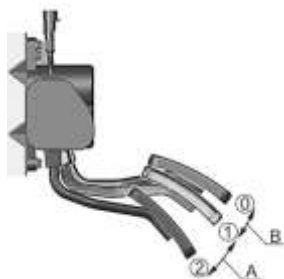


Рисунок 4. Режимы

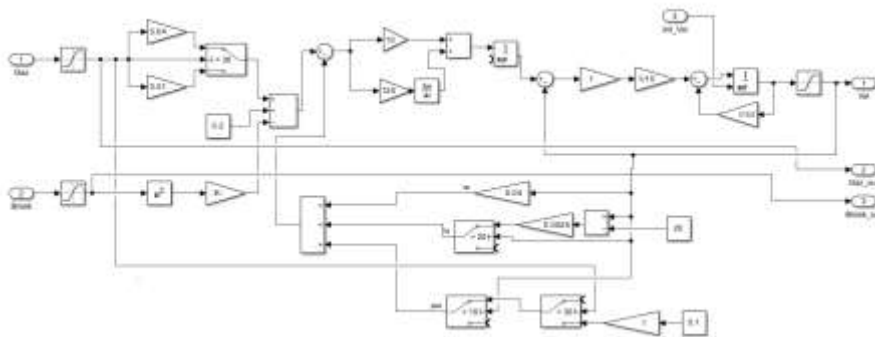


Рисунок 5. Модель автомобиля
работы акселератора

Регулятор состоит из трёх ПИД-регуляторов: педали газа для разгона, торможения (П-регулятор) и педали тормоза. Это сделано для того, чтобы педаль газа быстрее переходила в режим рекуперации. Модель регулятора приведена на рисунке 6.

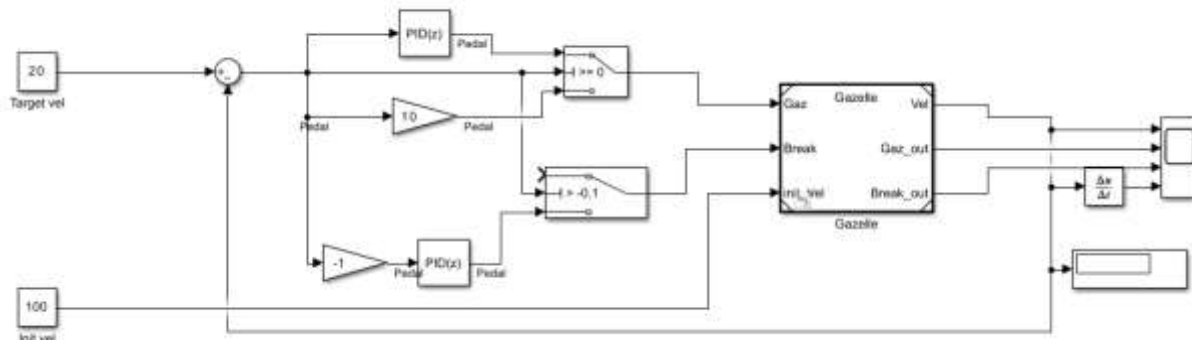


Рисунок 6. Модель регулятора

Система рулевого управления

Для передачи управляющего воздействия на рулевое колесо, установим электропривод на рулевой вал. Передачу момента осуществим с помощью шестерёночной передачи (рисунок 6). Обратную связь по углу будем получать с помощью встроенного энкодера привода и по разности угловых скоростей колёс. В дальнейшем планируется разработать адаптивный регулятор для максимально точного управления углом поворота. Рулевая колонка в сборе показана на рисунке 7. Также в рулевую систему планируется внедрить датчики для определения воздействия со стороны водителя для своевременного выключения автономного режима [2].



Рисунок 7. Крепление рулевого привода



Рисунок 8. Рулевая колонка в сборе

Системы управления оптикой

Поскольку нормальное движение по дороге невозможно без управления освещением и сигналами поворота, необходимо подавать на них управляющие сигналы. Для этого параллельно подрулевым переключателям разработаем блок реле и установим под торпеду (рисунок 9). В блок реле включим систему взведения и сброса аварийного контура и установим соответствующие кнопки налицевую панель (рисунок 10).

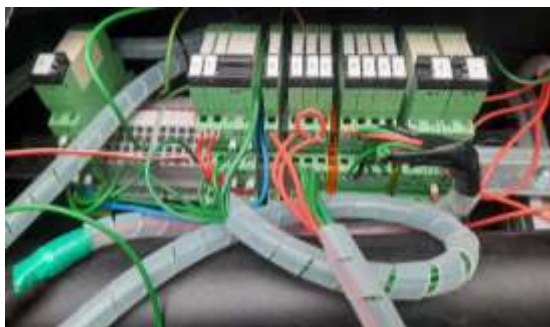


Рисунок 9. Блок реле



Рисунок 10. Кнопки аварийного контура

Заключение

В результате работы была определена структура автономной системы и её основные блоки, показана реализация основных элементов управления транспортом и описаны особенности их работы. Также приведены математические модели, созданные для разработки структуры регуляторов. В дальнейшем планируется тестирование системы, уточнение параметров регуляторов и измерение контрольных параметров системы.

Список литературы

1. Основные габаритные размеры Газель Некст, <https://gazel-rukovodstvo.ru/next/ex055.html> (дата обращения: 02.05.2026) - Текст: электронный.
2. Елисеев Е.И., Григорьев Л.В. Определение момента вращения рулевого колеса без вмешательства в работу системы рулевого управления. СБОРНИК ТРУДОВ XIV НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ ИНЖЕНЕРОВ «ЭНЕРГИЯ МОЛОДОСТИ» АО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ» 2026 (дата обращения: 03.05.2026)

РАЗРАБОТКА ПРОФОРИЕНТАЦИОННЫХ КЕЙСОВ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

КРАСНОВА С.¹, ЦЫКУНОВА Н.В.¹, САЛИХОВ К.Ф.¹

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Данная работа посвящена разработке профориентационных кейсов, моделирующих реальные задачи в области управления в технических системах. Такие кейсы позволяют будущим абитуриентам попробовать себя в роли инженера и оценить степень вовлеченности и интерес к инженерному делу и выбрать траекторию обучения по необходимому направлению.

Ключевые слова: профориентационный набор, программирование, геймификация

Современная профориентация все больше отходит от формального тестирования в пользу погружения в реальные задачи. Особенно это актуально для технических направлений, где просто рассказ о специальности не дает полного представления о будущей профессии.

Эффективным инструментом в таком случае становятся практико-ориентированные методы, которые позволяют участникам побыть в роли специалиста-инженера, например, по управлению техническими системами.

В основе разработанного подхода лежит метод кейсов, который предполагает анализ и решение ситуаций, максимально приближенный к реальным задачам по управлению.

Для направления подготовки специалистов в области «Управление в технических системах» были спроектированы кейсы, которые позволяют понять и заинтересовать такой специальностью. Участники не только стараются найти правильное решение при построении алгоритмов управления, а также учатся аргументировать выбор параметров, оценивать риски и прогнозировать последствия.

Для повышения вовлеченности были использованы элементы геймификации при разработке профориентационного набора. Игровые механики превращают обычное профориентационное занятие в игру, снижая страх перед сложной технической терминологией и помогая делать изучение таких систем с интересом для абитуриентов.

Разработанный набор состоит из нескольких кейсов с элементами геймификации и проходит апробацию у школьников различных инженерных классов.

В рамках кейса «Лабиринт» участникам предлагается готовая, однако намеренно содержащая ошибки программа для STM32. Программа позволяет управлять движением шарика по наклонной платформе через сервоприводы.

Физическая модель представляет собой лабиринт, детали которого напечатаны на 3D-принтере. Набор содержит плату, сервоприводы, джойстик и детали, которые необходимы для сборки прототипа (винты, гайки).

На рисунке 1 представлены элементы системы.

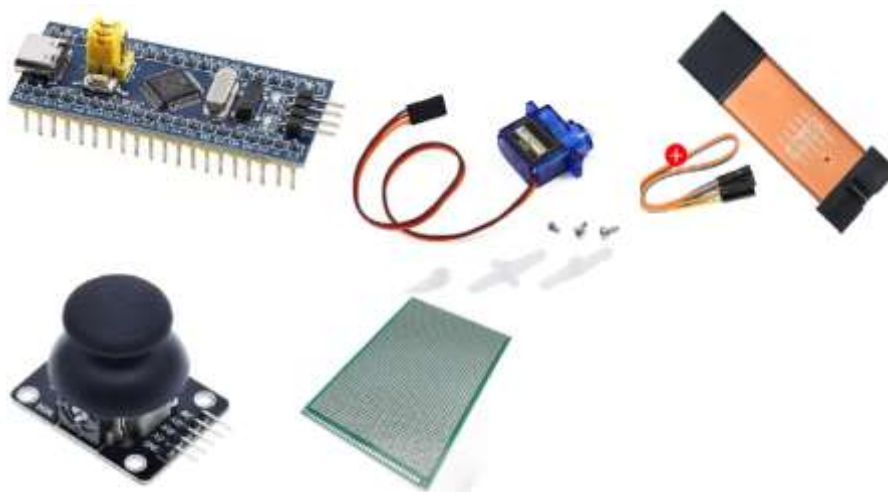


Рис. 1. Компоненты системы

Сборка прототипа произведена заранее, будущим абитуриентам необходимо только управлять объектом.

Разработанный комплекс профориентационных кейсов, включая практико-ориентированный кейс «Лабиринт», позволяет наглядно посмотреть и решить инженерные задачи по управлению в технических системах. Сочетание кейс-метода, геймификации и компактности разработки позволяет проводить профориентационные мероприятия не только в стенах ВУЗа, а также на других площадках: школах, образовательных выставках, форумах и другое.

Список литературы

1. Астахов, А. И. Профориентация в школе: психологический и педагогический аспекты: учебное пособие / А. И. Астахов. – Москва: Просвещение, 2021. – 192 с.

2. Бедарева, Т. В. 100 популярных профессий. Психология деятельности / Т. В. Бедарева, А. Г. Грецов. – Санкт-Петербург: Питер, 2020. – 208 с.

3. Блинов, В. И. Профориентация: профессия и карьера: учебное пособие для вузов / В. И. Блинов. – Москва: Юрайт, 2023. – 315 с.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

ЧЕРНОМОРЕЦ М.В.¹, ГОРБАТОВ М.М.¹, АМБРОСОВСКАЯ Е.Б.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Данная работа посвящена демонстрации эффекта воздушной подушки в лабораторных условиях и изучению на его примере особенностей моделирования как объекта управления.

Ключевые слова: воздушная подушка, математическое моделирование

В процессе работы были построены макет судна на воздушной подушке и математическая модель. В макете реализовано управление:

- по скорости, методом управления тяги движителей;
- по курсу, посредством изменения положения рулевых плоскостей, расположенных частично в набегающем воздушном потоке, частично - в реактивной струе, отбрасываемой движителями;

Исходя из поставленных задач управления, рассматривается движительно-рулевой комплекс, состоящий из одного или двух продольных движителей, и сервопривода с жесткой шарнирной связью с рулями направления.

В классической математической модели учитываются:

- особенности формы корпуса, для него произведен расчёт теоретических величин, с использованием закономерностей, освещённых в литературе;
- особенности создания воздушной подушки и работы нагнетательного комплекса;
- специфика работы движительно-рулевого комплекса, присущие объекту управления характерные инертность и влияние возмущающих факторов;

В ходе проектирования одной из немаловажных задач явилось создание контрольно-измерительной системы, позволяющей в дальнейшем оценить, насколько полученные результаты похожи на эмпирические закономерности, освещаемые в литературе по теме.

При создании испытательной платформы использована робототехническая платформа, в основе которой лежат контроллер ESP32 – выбран из соображений совместимости со средой arduino, наличия большого количества библиотек для любых нужд, а также возможностей организации беспроводной связи по стандартам WiFi и Bluetooth, что заметно упрощает решение вопросов организации дистанционного управления.

По мере изучения аналогичных моделей, также исходя из соображений использования самых доступных средств производства, были выбраны размеры:

- корпус – приблизительно формата А4 для основания, материал – картон, укрепленный на стыках и по углам вставками из картона армированный скотчем по периметру;
- нагнетатели – бесколлекторные двигатели, взятые с разобранной летающей игрушки Syma W1, достаточных для полётов длительностью до 20 мин, и зависания без перегрева;
- в качестве привода рулей выбран доступный сервопривод с развиваемым усилием 9 кгс, чего для нашей конструкции посчитали достаточным ввиду малого предполагаемого веса;

– пропеллеры фиксированного шага 0.8' и диаметром 3 дюйма в исходной модели развивают тягу, достаточную для полётов и зависания модели весом более 300 гр;

Конструкция модели позволяет установить один или два тяговых привода, что было полезно для оценки свойств ОУ в разных условиях. Управление тягой осуществляется путём изменения количества оборотов, поскольку применены винты фиксированного шага. Этот подход проще, но позволяет двигаться вдоль одной кривой эффективного упора, создаваемого пропеллером, и управлять возникающей реактивной тягой, причём сила эта направлена вдоль осевой линии. Исходя из законов Ньютона, это позволяет управлять скоростью движения, ограниченной сверху разницей сил развитой тяги, и полного сопротивления.

Рулевые поверхности, приводимые сервомашинкой, реализованы как пластиковые плоские лопасти, смонтированные на металлических осях, связаны в единый поворотный комплекс для синхронного управления и соединены тягами с поворотной частью привода. Так осуществляется управление текущим углом поворота поверхности руля к набегающему потоку, благодаря чему создаётся вектор сил, перпендикулярный продольной оси корпуса. Курсовой угол образуется между этим направлением и текущим вектором скорости. Программное управление курсовым углом позволяет осуществить движение по выбранной траектории.

Эффект воздушная подушка проявляется благодаря наличию гибкого ограждения, выполненного из плотного полиэтилена. Материал обладает достаточной прочностью на случай преодоления небольших преград, мало подвержен истиранию, в то же время гибкий, и при возникающем, благодаря нагнетателям, избыточном давлении под корпусом обеспечивает достаточное прилегание к поверхности, чтобы потери объема поддуваемого воздуха оставались минимальными.

В данный момент макет судна умеет:

- демонстрировать возникающий эффект воздушной подушки;
- использовать тягу толкающих двигателей для разгона;
- управлять рулевыми поверхностями;
- получать команды для исполнительных механизмов и осуществлять управление;
- продолжаются работы по интеграции в систему датчиков, используемых для измерений и для реализации обратной связи по отклонению от задаваемых параметров движения;

В рамках выполнения данной работы произведены расчёты вспомогательных характеристик судна, и математическое моделирование параметров движения – разгон, торможение, управление по курсу и траектории. Оценивается влияние внешних возмущающих факторов на устойчивость судна на курсе.

Далее планируются испытания над водной поверхностью с целью исследования возможности преодоления горба гидродинамического сопротивления, возникающего благодаря водоизмещению воздушной подушки, которая ведёт себя в таких условиях во многом похоже на корпус водоизмещающего судна, а до момента перехода в режим отрыва от поверхности воды – и вовсе с добавленным сопротивлением погруженной части конструкции ВП.

Предполагается, что ходкость судна в самой простой модели позволит двигаться только над твёрдой поверхностью, маневренность будет приемлемой только после развития некоторого уровня скорости, позволяющего иметь достаточную приложенную поперечную

силу для осуществления поворотов, проверить это экспериментально и подтвердить предложенные авторами других работ закономерности.

В ходе данной научной работы было показано, что СВП – перспективное направление, мало исследованное в разрезе осуществления автономного управления. Перспективы подобной автоматизации видятся в использовании подобных аппаратов для транспортных нужд в условиях плохо проходимой другими видами техники местности, с возможностью экономии на операциях по перегрузке между разными средствами доставки. Кроме очевидных примеров болотистых местностей, при постройке полномасштабных проектов, возможно также осуществлять спасательные операции на водной поверхности, обеспечение грузами удалённых локаций в условиях северного ледовитого океана, и даже обеспечение транспортных потребностей в районах пустынь или при отсутствующих дорогах.

Модели такого типа отлично подходят для изучения свойств ОУ, так как не требуют дополнительных разрешений, как для летающих устройств. И притом позволяют реализовать в условиях лабораторий замкнутые системы управления, для работы с различными несовершенствами реального объекта – инертностью, аэро- и гидродинамикой, исследовать вопросы эффективности толкающих винтов и создания упора на рулевых поверхностях.

Список литературы

1. Колызаев Б. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Су- достроение, 1980. 472 с.
2. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 3. Управляемость водоизме- щающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами под- держания / под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 544 с.
3. Лукомский Ю. А., Корчанов В. М. Управление морскими подвижными объектами: учеб. СПб.: Элмор, 1996. 320 с.
4. Демешко Г. Ф. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. в 2-х кн. Л.: Судостроение, 1992. 269 с.
5. Бенуа Ю. Ю., Корсаков В. М. Суда на воздушной подушке: Государственное издательство судостроительной промышленности, 1962. 121 с.
6. Ваганов А. М. Проектирование скоростных судов. Л.: Судостроение, 1978. 279 с.
7. Бень Е. Модели и любительские суда на воздушной подушке. Л.: Судостроение, 1983. 129 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

ЧЕРЫКОВ Л.А.1

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Разработана измерительно-управляющая система подводного аппарата на базе двух контроллеров Arduino. Система выполняет сбор, обработку и отображение телеметрической информации в режиме реального времени. Для оценки пространственной ориентации используется инерциальный модуль MPU-9250 и фильтр Маджвика, реализованный в кватернионной форме. Разработан протокол передачи данных на основе NMEA-подобных сообщений и веб-интерфейс оператора для отображения телеметрии и управления аппаратом. Проведены Экспериментальные испытания системы и создан демонстрационный стенд.

Ключевые слова: обитаемый подводный аппарат, Arduino, MPU-9250, фильтр Маджвика, измерительная система, NMEA, web-интерфейс

Введение

В последние годы активно развиваются необитаемые подводные аппараты инспекционного типа. Они используются для обследования подводных объектов и мониторинга инфраструктуры. Для таких аппаратов важно иметь простые и надежные измерительно-управляющие системы, которые позволяют определять параметры движения и ориентацию в реальном времени.

В рамках выпускной квалификационной работы была поставлена задача разработать структуру измерительно-управляющей системы подводного аппарата, включающую измерительный блок, обработку и передачу данных.

Измерительный блок реализован в виде лабораторно-демонстрационной установки. Это позволяет проводить испытания алгоритмов и оценивать работу системы.

Аппаратная часть системы построена на двух контроллерах Arduino. Первый выполняет обработку данных датчиков и вычисление параметров ориентации. Второй обеспечивает обмен данными со станцией оператора и управление исполнительными устройствами.

Измерительная система и обработка ориентации

В измерительной системе используется инерциальный измерительный модуль MPU-9250, содержащий акселерометр, гироскоп и магнитометр.

Для вычисления пространственной ориентации используется фильтр Маджвика. Алгоритм выполняет комплексирование данных инерциальных датчиков и формирует оценку ориентации аппарата в виде углов крена, дифферента и курса.

Фильтр Маджвика позволил получить устойчивые оценки ориентации при низкой вычислительной нагрузке. Испытания показали, что погрешность определения углов не превышает 1° .

В системе реализован канал измерения глубины на основе датчика давления и фильтра Калмана.

Протокол передачи телеметрии

Для обмена данными между контроллерами реализован текстовый протокол передачи данных на основе NMEA-подобных сообщений. Посылки включают идентификатор системы, время, угловые скорости, углы ориентации, глубину и контрольную сумму.

Передача данных между микроконтроллерами осуществляется по UART-интерфейсу. Далее данные передаются на станцию оператора через Ethernet-соединение с использованием протокола TCP/IP.

NMEA-подобный формат делает систему открытой для подключения дополнительных измерительных модулей и интеграции с другими системами управления и навигации.

Web-интерфейс оператора

Для отображения телеметрии разработан web-интерфейс оператора. Интерфейс обеспечивает прием и визуализацию данных в режиме реального времени.

В web-интерфейсе отображаются:

- углы крена, дифферента и курса;
- визуализация положения;
- угловые скорости по трем осям;
- глубина погружения;
- состояние связи и валидность данных;
- управляющие сигналы движителей.

Дополнительно реализовано дистанционное управление движителями аппарата через web-интерфейс.

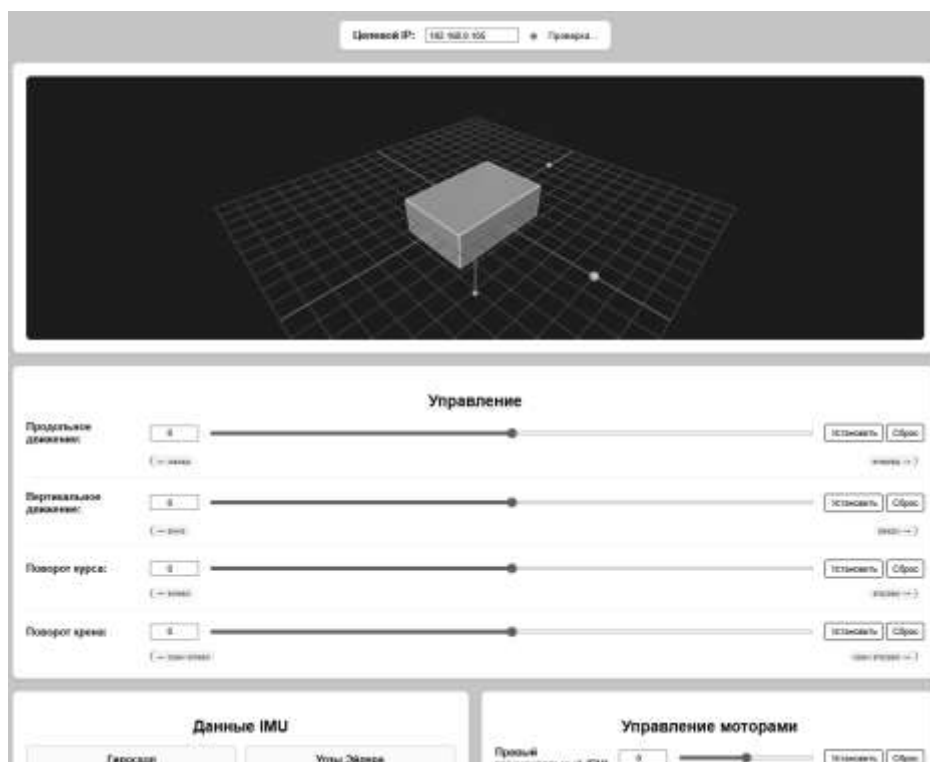


Рис. 1. Интерфейс оператора

Демонстрационный стенд

Для проверки системы создан стенд, включающий два контроллера Arduino, свитч, модуль MPU-9250 и персональный компьютер с web-интерфейсом.

В ходе испытаний выполнена проверка устойчивости работы фильтра Маджвика, передачи NMEA-посылок, отображения телеметрии, работы web-интерфейса, корректности вычисления ориентации.

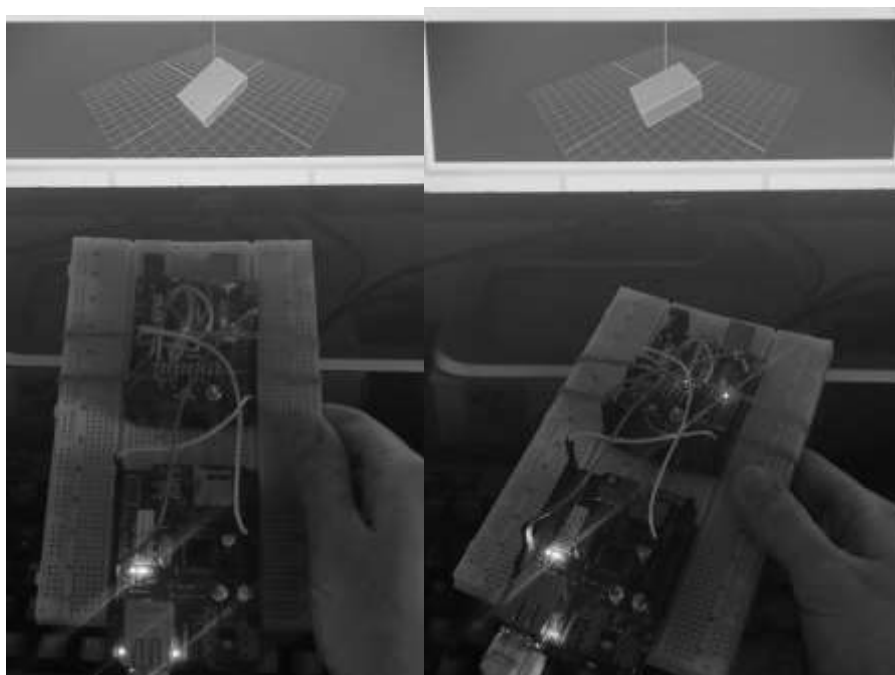


Рис. 2. Демонстрационный стенд измерительно-управляющей системы

Заключение

Реализована измерительно-управляющая система подводного аппарата на базе контроллеров Arduino. Система обеспечивает сбор и обработку телеметрической информации, вычисление пространственной ориентации с использованием фильтра Маджвика, передачу данных в формате NMEA-подобных сообщений и отображение параметров движения в web-интерфейсе оператора.

Разработанная архитектура системы и открытый формат телеметрических сообщений позволяют расширять функциональность системы и интегрировать дополнительные измерительные модули и алгоритмы управления.

Список литературы

1. Madgwick S. O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. — University of Bristol, 2010.
2. Амбросовская Е. Б., Амбросовский В. М., Проскурников А. В., Ромаев Д. В. Судовые системы управления движением и маневрированием: модели и алгоритмы: учебник. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. 283 с. ISBN 978-5-7629-3602-6.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА АВТОНОМНОГО СУДНА ДЛЯ УКЛОНЕНИЯ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

СОЛОВЬЕВ К.Д.1

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Рассмотрена задача построения безопасного маршрута безэкипажного судна в реальном времени. Разработана имитационная модель движения, основанная на упрощённой модели Номото с ПИД-регулятором курса. Проведён сравнительный анализ методов глобального планирования: алгоритм A^* на регулярной сетке, графе видимости и диаграмме Вороного, а также метод искусственных потенциальных полей (APF). Локальное уклонение от статических и динамических препятствий реализовано гибридным APF с выходом из локальных минимумов через A^* на диаграмме Вороного. Подвижные цели обрабатываются путём создания виртуальных статических препятствий с учётом правил МППСС-72. Эксперименты на реальной карте подтвердили работоспособность алгоритмов и их применимость в узких проходах.

Ключевые слова: автономное судно, планирование маршрута, обход препятствий, A^* , потенциальные поля, диаграмма Вороного, МППСС-72

Введение

Безэкипажные суда (БЭС) – одно из наиболее динамично развивающихся направлений морской робототехники. Ключевой функцией, обеспечивающей автономность, является способность самостоятельно прокладывать и корректировать траекторию с учётом статических и динамических препятствий, а также международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС-72) [1, 2]. Традиционно задача делится на глобальное планирование (построение оптимального маршрута по известной карте) и локальное планирование (оперативное уклонение от неучтённых или движущихся объектов с возвратом на глобальный путь). Специфика судов – большая инерционность и ограниченная манёвренность – предъявляет жёсткие требования к допустимой кривизне траектории и дистанции расхождения.

Цель настоящей работы – разработка и программная реализация алгоритмов, объединяющих глобальное и локальное планирование маршрута БЭС в единой имитационной модели, функционирующей в реальном времени.

Модель движения судна

Для воспроизведения динамики судна использована упрощённая модель Номото второго порядка, описывающая эволюцию угловой скорости рыскания в зависимости от угла перекладки руля [3]. Управление курсом осуществляется ПИД-регулятором, скоростью – П-регулятором. Хотя реальные авторулевые используют более сложные законы (адаптивные регуляторы, нечёткие регуляторы, LQG), выбранная модель обеспечивает адекватное поведение при умеренных вычислительных затратах, что достаточно для отработки алгоритмов планирования высокого уровня.

Параметры модели (постоянные времени T_1 , T_2 , коэффициент K) подбирались эмпирически для трёх тестовых судов разного водоизмещения: лёгкая яхта ($L=24,4$ м, $m\approx 100$ т), среднее быстроходное судно ($L=65$ м, $m\approx 3500$ т) и тяжёлое судно ($L=76,4$ м, $m\approx 5032$ т).

Моделирование маршрута в акватории Финского залива (протяжённость ~ 25 км, 10 путевых точек, плоская локальная проекция) показало, что все три судна уверенно удерживаются в заданном коридоре ± 200 м со снижением скорости на крутых поворотах.

Глобальное планирование маршрута

Глобальный путь строится до начала движения на основе статической карты препятствий (береговая линия, навигационные опасности, буферные зоны). Реализованы и сопоставлены несколько представлений свободного пространства для алгоритма A^* [4]:

- регулярная сетка с шагом 40 м;
- граф видимости, вершинами которого служат углы полигонов препятствий, а рёбра – отрезки, не пересекающие препятствий;
- диаграмма Вороного, построенная по центрам масс препятствий и дополненная точками на границах карты.

Для каждого варианта добавлена буферная зона (200 м), гарантирующая безопасное расстояние до суши. Эксперименты проводились на реальном участке карты (район г. Приморск, Ленинградская обл.) размером $15\times 13,5$ км.

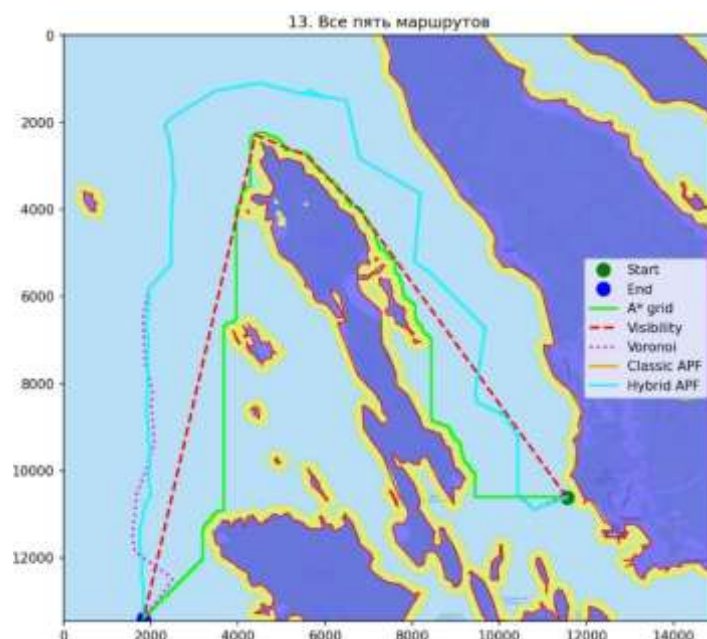


Рис. 1. Построение глобального маршрута разными методами

Таблица 1

Результаты построения глобального планирования

Алгоритм	Длина (м)	Время (с)
A* grid	29240,00	161,667
Visibility graph	22535,80	1,379
Voronoi	29292,66	1,492

Сравнение показало, что граф видимости даёт кратчайший путь (~22,5 км), диаграмма Вороного формирует наиболее безопасный «серединный» маршрут (~29,3 км), а сеточный A* при шаге 40 м проигрывает по времени вычислений (более 160 с против 1,4-1,5 с у двух других методов). Приоритет безопасности делает диаграмму Вороного предпочтительной для морской навигации.

Локальное планирование и учёт МППСС-72

Для оперативного уклонения от внезапно обнаруженных препятствий предложен гибридный метод искусственных потенциальных полей (APF). Целевая точка притягивает судно, а препятствия создают отталкивающее поле [5]. Главный недостаток классического APF – застревание в локальных минимумах – устранён переключением на A* по диаграмме Вороного: при обнаружении застревания текущая позиция связывается с ближайшей вершиной Вороного, и алгоритм прокладывает участок пути до вершины с минимальным потенциалом.

Динамические препятствия обрабатываются путём формирования виртуального статического препятствия в прогнозируемой точке цели. При обгоне (Правило 13) виртуальное препятствие смещается вперёд по курсу обгоняемого судна; при расхождении на встречных курсах (Правило 14) – дополнительно смещается на левый борт цели, вынуждая безэкипажное судно уклоняться вправо. В обоих случаях локальный планировщик работает с единым механизмом APF.

Моделирование на тестовом маршруте показало:

- для статического препятствия – максимальное отклонение от глобального маршрута 175 м (при допуске 200 м);
- в маневре обгона – дистанция наибольшего сближения около 105 м;
- при встречном расхождении – дистанция сближения около 130 м.

Работоспособность алгоритма также проверена на реальном участке карты (выход из яхт-клуба, ширина прохода ~40 м). В стеснённых условиях пришлось снизить допустимый порог отклонения до 20 м и скорость судна до 8 % от максимальной. В сценариях «Обгон» и «Расхождение» дистанция между центрами масс судов (ширина каждого 15 м) составила 25 и 20 м соответственно, что подтверждает применимость метода в узких проходах.

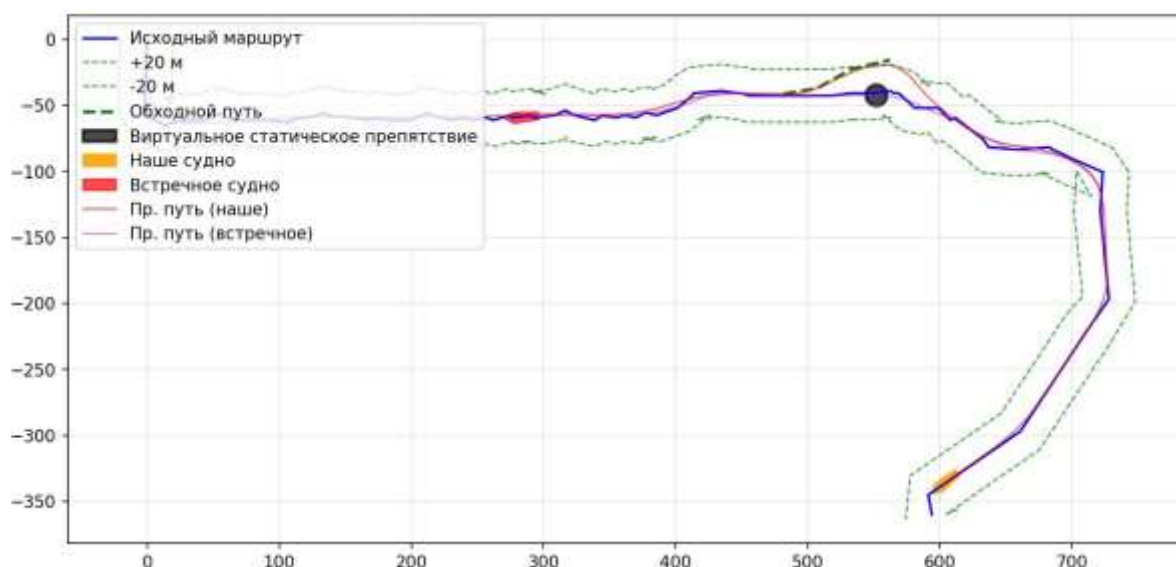


Рис. 2. Маневр «Расхождение» между двумя судами в узком проходе

Ограничением алгоритма является зависимость от физических размеров судов: пара ширококорпусных судов (ширина 17 м) не сможет безопасно разойтись в проходе 40 м – необходимо увеличивать коридор или выбирать менее габаритные суда

Заключение

Разработан комплекс алгоритмов глобального и локального планирования маршрута безэкипажного судна. Глобальный маршрут, построенный по диаграмме Вороного с A*, обеспечивает максимальную безопасность вблизи препятствий. Гибридный АРФ с выходом из локальных минимумов через диаграмму Вороного позволяет в реальном времени обходить статические и динамические препятствия с соблюдением Правил 13 и 14 МП-ПСС-72. Имитационное моделирование на трёх типах судов подтвердило корректность и вычислительную эффективность предложенных решений. В перспективе целесообразно дополнить алгоритм методами машинного обучения для классификации намерений встречных судов и адаптации к сложным гидрометеороусловиям.

Список литературы

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). – СПб.: ЦНИИМФ, 2023. – 110 с.
2. Vagale A., Oucheikh R., Bye R.T. Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: a review // Journal of Marine Science and Technology. – 2021. – Vol. 26. – P. 1292–1306.
3. Амбросовская Е.Б., Амбросовский В.М., Проскурников А.В., Ромаев Д.В. Судовые системы управления движением и маневрированием: модели и алгоритмы. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – 283 с.

4. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern. – 1968. – Vol. SSC-4, № 2. – P. 100–107.

5. Платонов А.К. Метод потенциалов в задаче выбора пути. – М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2001. – Препринт № 40.

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО СЛИЯНИЯ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ИХ ДЕГРАДАЦИИ

КОВАЛЕВ Г.М.¹, ГОГОЛЕВ Е.Е.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В работе исследуется вопрос временной деградации данных камеры и LiDAR. Проводится проверка гипотезы того, что можно повысить точность обнаружения за счет применения избыточности данных в виде LiDAR, механизма взвешивания признаков на основе СВМ (Convolutional Block Attention Module) и YOLOv8n. Обучение и экспериментальная проверка модели произведены на наборе данных AU-AIR. Результаты показывают сравнимое отличие предложенного механизма по метрике mAP (mean Average Precision).

Ключевые слова: датчики, сенсоры, обработка данных, сенсорное слияние, обработка графических данных, склейка

Введение

Современные технические системы состоят из огромного количества узлов и выполняют сложные функции для решения самых различных задач. Их элементы представлены в реальном мире и подвержены воздействию различного рода [1]. С течением времени, например, данные камеры становятся менее четкими, более размытыми, а LiDAR может возвращать какой-то пучок точек пустоты [2]. Целью данного исследования является проверка гипотезы о том, что в условиях временной деградации данных можно повысить точность обнаружения объектов за счет склейки полученных данных камеры и LiDAR.

Разработка модели

Для проведения эксперимента и разработки модели был найден набор данных AU-AIR [3], содержащий размеченные видеоролики с подвижной камеры. Пример данных представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Пример данных

Так как данный набор данных не содержал в себе LiDAR, то для проведения тестов и валидации для него были синтетически сгенерированы карты глубины с помощью MiDaS v3.1 [4]. Выбор модели произведен на основании ее точности к разнородным сценам. Более того данная модель поддерживает обработку данных с произвольным соотношением сторон, что важно, так как кадры часто имеют нестандартные пропорции. Пример полученных карт глубины представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Пример карты глубины

Архитектура модели представлена на рисунке 3. В ней используется видеопоток и LiDAR-поток. Для каждого потока данных извлекаются карты признаков с помощью Mobile-NetV3. На выходе получается 4 карты признаков, которые склеиваются и последовательно в формате $[R, G, B, D]$ и подаются в блок CBAM, который вычисляет ценность полученных признаков для текущего кадра. Это важно, когда один из датчиков работает существенно хуже.

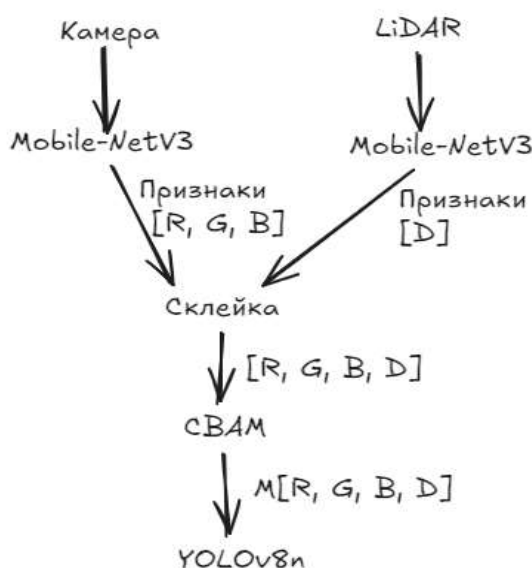


Рис. 3. Архитектура решения

Данные и симуляция

Видеоматериалы (8) были разбиты на обучающую (6), валидационную (1) и тестовую (1) выборки. Для тестового видеофрагмента созданы 5 уровней деградации данных, которые линейно нарастают к концу фрагмента. Подробное их описание представлено в таблице 1.

Таблица 1

Описание деградации данных

Уровень	Описание деградации
0 (чистый)	Исходные RGB и глубина, без шума.
1 (слабый)	RGB: Гауссов шум ($\sigma=5$). Глубина: Гауссов шум ($\sigma=0.02$).
2 (средний)	RGB: шум ($\sigma=15$), размытие ($\text{kernel}=3$). Глубина: шум ($\sigma=0.05$).
3 (сильный)	RGB: шум ($\sigma=25$), размытие ($\text{kernel}=5$). Глубина: шум ($\sigma=0.10$), вероятность пропуска глубины 10% (замена на среднее значение).
4 (критический)	RGB: шум ($\sigma=40$), размытие ($\text{kernel}=7$). Глубина: шум ($\sigma=0.15$), пропуск глубины 30%, плюс задержка на один кадр.

Примеры деградации RGB каналов и канала глубины для изображения из тестового набора данных представлены на рисунках 4, 5.



Рис. 4. Пример деградации данных (RGB)

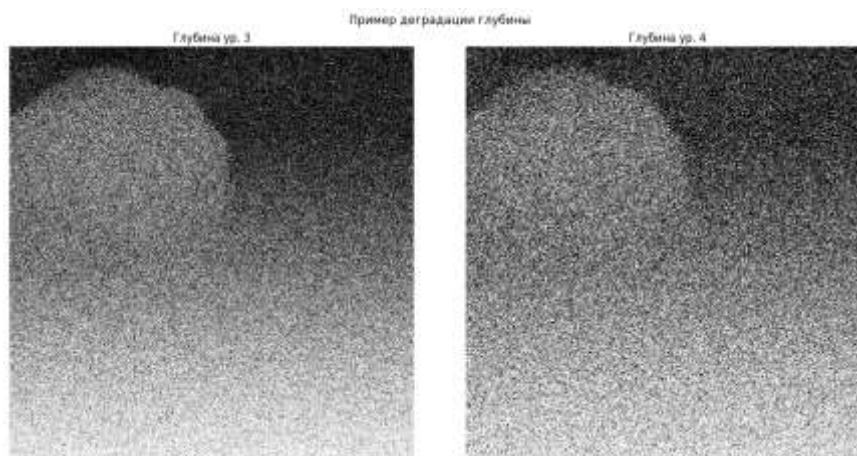


Рис. 5. Пример деградации данных (D)

Для экспериментальной проверки использовались модели:

1. YOLOv8n, обученный только на RGB AU-AIR.
2. YOLOv8n, с картой глубины (4 канала на вход).
3. Предложенная модель.

Данные модели были обучены (Fine-Tuning) на чистых данных AU-AIR и использовались для исследования эффективности предложенного решения.

Обученные модели проходили тестирование на видеофрагменте с постепенной деградацией данных. Для каждого временного сегмента ролика (первые 20%, средние 20%, последние 20% кадров) вычислялась метрика mAP 5 раз для разных значений seed. Полученные результаты представлены на рисунках 6-7.

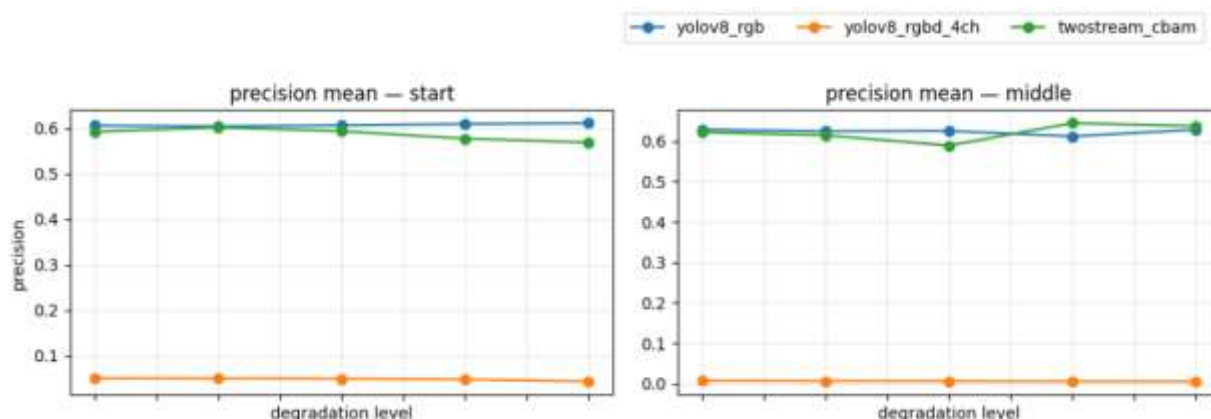


Рис. 6. Полученные результаты начала и середины фрагмента

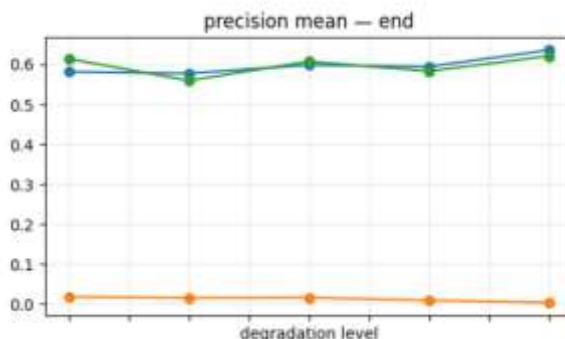


Рис. 7. Полученные результаты конца фрагмента

Выводы

Результаты проведенного эксперимента показывают, что предложенная модель показывает незначительное отличие предложенной модели от изначальной. Полученные результаты сравнимы и создают направления дальнейших исследований. В ходе проведения эксперимента были выявлены недостатки найденного набора данных. Гипотеза не подтверждена.

Список литературы

1. Буймистряк, Г. Технологии слияния сенсорной информации для управления в критических ситуациях.
2. M. U. Y. Khan, S. A. A. Shah, S. R. Naqv. An in-depth evaluation of deep learning-enabled adaptive approaches for detecting obstacles using sensor-fused data in autonomous vehicles.
3. Набор данных AU-AIR. — URL: https://fmi-data-index.github.io/au_air.html
4. MiDaS. — URL: <https://github.com/isl-org/MiDaS>

ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ ICP-КАЛИБРОВКИ ИНСТРУМЕНТА МАНИПУЛЯТОРА

ШАЛИМОВА А.С.1, МЕДВЕЖЕНКОВА М. М. 1, КАЛУЦКАЯ Е.Д. 1

*1 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»*

Аннотация. В работе исследуется устойчивость метода Iterative Closest Point (ICP) при восстановлении пространственного преобразования инструмента манипулятора по облакам точек. Для оценки робастности использован численный эксперимент: к эталонному облаку, сформированному по STL-модели, применялось известное преобразование, после чего моделировались гауссовский шум, случайные выбросы и частичное удаление точек. Сравнивались базовый point-to-point ICP, ICP с предварительной обработкой, point-to-plane ICP и комбинированный подход GPFH/RANSAC + point-to-plane ICP. Показано, что эффективность методов зависит от типа искажений: при малых искажениях и выбросах базовый ICP остаётся достаточно точным, а при значительной разреженности облака лучшие результаты показывает комбинированный подход.

Ключевые слова: ICP-алгоритм калибровки, облако точек, фильтрация, матрица трансформации, гауссовский шум.

Введение

Современные манипуляторы широко применяются в задачах обработки, сборки и контроля качества, при этом всё более активно используются методы, основанные на анализе облаков точек. Однако данные, получаемые с систем трёхмерного сканирования, как правило, содержат различные искажения, такие как аддитивный шум, выбросы и неполнота данных, обусловленные особенностями работы сенсоров и условиями съёмки.

Наличие таких искажений влияет на качество последующей обработки и, в частности, на точность алгоритмов регистрации облаков точек. Одним из наиболее распространённых методов калибровки является алгоритм Iterative Closest Point, однако его эффективность и сходимость существенно зависят от характеристик входных данных: при увеличении уровня шума ошибка трансляции может существенно возрасти по сравнению с низким уровнем шума.

В связи с этим актуальной задачей является исследование устойчивости ICP к различным типам шумов и разработка подходов, позволяющих повысить его робастность при работе с зашумлёнными и неполными облаками точек.

Постановка задачи

В настоящей работе исследуется робастность метода ICP в экспериментах совмещения облака точек, сформированного по STL-модели инструмента, с его синтетически преобразованной версией при наличии шума, выбросов и разреженности данных. Задача заключается в восстановлении матрицы пространственного преобразования и оценке точности её определения.

Методика исследования

Алгоритм Iterative Closest Point (ICP) предназначен для оценки жёсткого пространственного преобразования между двумя облаками точек путём минимизации расстояния между соответствующими точками [1]. Алгоритм реализуется итеративно: на каждом шаге для точек x_i исходного облака определяется ближайшее соответствие в целевом облаке y_i , после чего вычисляется преобразование, задаваемое матрицей поворота R и вектором переноса t , минимизирующее суммарную квадратичную ошибку.

$\min_{R,t} \sum_{i=1}^N \|Rx_i + t - y_i\|^2$, где x_i – точки исходного облака, y_i – соответствующие точки целевого облака, R – матрица поворота, t – вектор переноса, N – количество точек. Найденное преобразование применяется к исходному облаку, и процедура повторяется до достижения сходимости.

В результате получается матрица преобразования, обеспечивающая наилучшее совмещение облаков точек до заданной сходимости.

Рассматриваемые варианты алгоритмов калибровки

В работе рассмотрены различные варианты реализации алгоритма совмещения облака точек, отличающиеся используемой функцией ошибки и наличием этапа предварительной обработки данных. В качестве базового подхода применялся классический ICP в постановке point-to-point, минимизирующий евклидово расстояние между соответствующими точками облаков.

С целью повышения устойчивости к шумам и выбросам исследовался вариант с предварительной обработкой облаков точек, включающей воксельное прореживание и удаление выбросов на основе анализа локальной структуры данных. Данный подход направлен на уменьшение влияния аномальных наблюдений и повышение корректности формирования соответствий, что, в свою очередь, способствует улучшению сходимости алгоритма.

Кроме того, рассматривалась модификация ICP с использованием метрики point-to-plane, в которой минимизируется расстояние от точки одного облака до касательной плоскости второго $\min_{R,t} \sum_{i=1}^N (n_i^T (Rx_i + t - y_i))^2$, где n_i – нормаль к поверхности в точке y_i [2]. Учет локальной геометрии поверхности позволяет повысить устойчивость алгоритма и точность регистрации, особенно при наличии гладких участков.

Последним рассматривался подход с этапом глобального совмещения, в котором перед применением ICP выполняется предварительное выравнивание облаков с использованием FPFH и RANSAC [3]. Это позволяет получить начальное приближение преобразования и повысить устойчивость алгоритма к значительным начальным рассогласованиям, снижая вероятность сходимости к локальному минимуму.

Численный эксперимент

Для количественной оценки устойчивости методов был проведён численный эксперимент. К эталонному облаку применялось известное преобразование, после чего добавлялись искажения.

Добавлялся аддитивный гауссовский шум с различными уровнями, моделирующий погрешности измерений. $x_i' = x_i + \epsilon$, $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$, где ϵ – случайная величина с нормальным распределением, σ – стандартное отклонение шума.

Также добавлялись выбросы — случайные точки, не принадлежащие объекту. Дополнительно исследовалась разреженность путём удаления части точек.

Так как истинная матрица преобразования была известна заранее, стало возможным вычислить ошибку восстановления в миллиметрах и градусах. В ходе эксперимента рассматривались различные уровни искажений входных данных. Аддитивный гауссовский шум добавлялся с характерными значениями стандартного отклонения 0,5 мм, 1 мм, 2 мм и 5 мм. Кроме того, моделировалось наличие случайных выбросов, доля которых составляла 1%, 5% и 10% от общего числа точек. Также исследовалось влияние разреженности облака точек, для чего случайным образом удалялась часть точек в объёме 10%, 30% и 50%.

Экспериментальная часть

Сравнивались четыре варианта: А – базовый point-to-point ICP без фильтрации; В – voxel downsampling и удаление выбросов перед point-to-point ICP; С – point-to-plane ICP; D – глобальная инициализация по FPFH/RANSAC с последующим уточнением point-to-plane ICP [4].

Метрики качества

Средняя ошибка по точкам $e_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| Rx_i + t - y_i \|$, где x_i – точки исходного облака, y_i – соответствующие точки эталонного облака, R – матрица поворота, t – вектор переноса, N – количество точек.

Ошибка смещения $e_t = \| t_{est} - t_{true} \|$, где t_{est} – оценённый вектор переноса, t_{true} – истинное значение.

Ошибка поворота $e_R = \arccos\left(\frac{tr(R_{true}^{-1}R_{est})-1}{2}\right)$, где R_{est} – оценённая матрица поворота, R_{true} – истинная матрица поворота, $tr()$ – след матрицы.

RMSE = $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| Rx_i + t - y_i \|^2}$, где x_i – очки исходного облака, y_i – соответствующие точки целевого облака, R – матрица поворота, t – вектор переноса, N – количество точек

Результаты

Анализ результатов показал, что наибольшее влияние на точность регистрации оказывают гауссовский шум и частичное удаление точек.

Таблица 1

Средняя ошибка смещения, мм, по всем сценариям

Метод	Гауссовский шум				Доля выбросов			Удаление точек		
	0,5 мм	1 мм	2 мм	5 мм	1%	5%	10%	10%	30%	50%
A	0,021	0,069	0,215	1,358	0,002	0,004	0,005	0,975	3,489	4,501
B	0,077	0,162	0,494	8,606	0,026	0,025	0,027	0,986	1,644	3,716
C	0,034	0,073	0,143	0,592	0,009	0,020	0,027	0,209	2,230	1,827
D	0,034	0,073	0,376	0,592	0,009	0,020	0,027	0,044	0,053	0,069

Таблица 2

Средняя ошибка поворота, рад, по всем сценариям

Метод	Гауссовский шум				Доля выбросов			Удаление точек		
	0,5 мм	1 мм	2 мм	5 мм	1%	5%	10%	10%	30%	50%
A	0,052	0,137	0,318	1,350	0,006	0,013	0,023	0,085	0,887	1,190
B	0,123	0,214	0,709	9,847	0,080	0,082	0,096	0,179	1,108	1,276
C	0,053	0,119	0,267	1,411	0,014	0,031	0,043	0,071	0,100	0,141
D	0,053	0,119	0,260	1,411	0,014	0,031	0,044	0,070	0,092	0,144



Рис. 1. Примеры регистрации облаков точек при гауссовском шуме, частичном удалении точек и добавлении выбросов: серым показано эталонное облако, красным — искажённые данные, зелёным — полученный результат

При увеличении уровня шума ошибки смещения и поворота возрастают для всех рассмотренных методов. Point-to-plane ICP и комбинированный подход позволяют снизить ошибку смещения при сильном шуме, однако не всегда улучшают ошибку поворота. При добавлении выбросов базовый ICP в проведённых экспериментах показал наименьшие ошибки, поэтому предварительная фильтрация в выбранной конфигурации не дала универсального улучшения. Наиболее заметное преимущество комбинированного подхода FPFH/RANSAC + point-to-plane ICP проявилось при частичном удалении точек, где он обеспечил существенно меньшую ошибку по сравнению с базовым ICP.

Заключение

В работе выполнена численная оценка робастности ICP-регистрации при наличии шума, выбросов и неполноты облака точек. Установлено, что универсально лучшего метода для всех типов искажений не выявлено: базовый ICP эффективен при малых искажениях и выбросах, point-to-plane ICP может снижать ошибку смещения при повышенном шуме, а комбинированный подход наиболее устойчив при частичном удалении точек. Полученные результаты показывают, что выбор схемы регистрации должен учитывать характер искажений входных данных. Предварительная обработка облака точек требует дополнительной настройки параметров, поскольку в выбранной конфигурации она не обеспечила стабильного повышения точности.

Следует отметить, что представленные результаты получены на моделируемых данных. В дальнейшем планируется проведение аналогичного анализа на реальных облаках точек, полученных с использованием глубинных сенсоров.

Список литературы

1. Besl P. J., McKay N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, No. 2. P. 239-256.
2. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient Variants of the ICP Algorithm // Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. 2001. P. 145-152.
3. Rusu R. B., Blodow N., Beetz M. Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. P. 3212-3217.
4. Zhou Q.-Y., Park J., Koltun V. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. arXiv:1801.09847, 2018.

РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ РОТОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И КОМПЛЕКСА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

Подсевалов Ю.В.1

1 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В статье рассматривается задача автоматизированной вибродиагностики роторных машин на основе комплекса временных, спектральных и вейвлет-признаков. Для классификации технического состояния применяется алгоритм Random Forest. Показано, что добавление вейвлет-преобразования повышает информативность признакового описания и улучшает распознавание дефектов по вибрационным сигналам.

Ключевые слова: вибродиагностика, роторные машины, вейвлет-преобразование, Random Forest

Введение

Вибрационный контроль является одним из наиболее распространённых и информативных подходов к диагностике технического состояния роторных машин. Изменения вибрационного сигнала часто сопровождают такие дефекты, как дисбаланс, расцентровка и повреждения подшипников [1]. Поэтому измерение и анализ вибрации с помощью акселерометров широко применяются в задачах мониторинга состояния оборудования [2, 3].

Одним из наиболее эффективных инструментов вибро сигналов является вейвлет-преобразование [4, 5]. В отличие от классического преобразования Фурье, оно позволяет исследовать сигнал одновременно во временной и частотной областях. Вейвлет-преобразование особенно полезно при диагностике нестационарных процессов, характерных для вращающихся машин. Вейвлет-анализ успешно применяется для выявления слабых и составных дефектов, а также для выделения ударных и модулированных компонент вибросигнала [5].

Для классификации технического состояния оборудования используются ансамблевые методы машинного обучения, в том числе Random Forest [6, 7, 8]. Он представляет собой ансамбль решающих деревьев, где каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и случайном подмножестве признаков, а итоговое решение принимается голосованием деревьев.

В качестве экспериментальной базы используется набор данных, полученный на испытательном стенде при различных режимах работы и различных видах неисправностей. В него входят записи исправного состояния, дисбаланса, горизонтального и вертикального смещения, а также дефектов подшипников качения. Такой набор удобен для сравнения различных схем формирования признаков и оценки влияния вейвлет-преобразования на качество классификации [9].

Целью работы является исследование эффективности классификации состояний роторной машины по вибрационным сигналам на основе алгоритма Random Forest. А также оценка влияния временных, частотных и вейвлет-признаков на качество классификации [7].

Основная часть

Вибрационный сигнал роторной машины представляет собой нестационарный процесс, в котором полезная диагностическая информация часто скрыта на фоне гармоник вращения и переходных режимов. Поэтому для распознавания технического состояния недостаточно

только визуального анализа осциллограммы: требуется выделение признаков, чувствительных к локальным изменениям формы сигнала, его спектра и кратковременным импульсным событиям [10, 11]. Именно поэтому в вибродиагностике сочетают временные, частотные и частотно-временные признаки, а в качестве классификатора применяют устойчивые ансамблевые методы машинного обучения [8].

В данной работе задача формулируется как многоклассовая классификация состояния механической системы по вибрационным измерениям. Для каждого файла сигнала извлекается набор признаков, после чего формируется вектор признаков и подаётся на вход классификатору Random Forest [7, 9]. Такой подход позволяет отделить этап извлечения информативных характеристик от этапа принятия решения, а также сравнить вклад различных групп признаков в итоговое качество классификации.

Пусть после предварительной обработки вибрационный сигнал одного канала задан дискретной последовательностью $x[n]$, $n = 1, \dots, N$. Для каждой записи рассчитывается набор признаков трех типов: временных, спектральных и вейвлет-признаков [12, 13, 5]. Такой подход позволяет описывать сигнал одновременно по уровню, форме, частотному составу и локальным нестационарным изменениям.

Признаки временной области

Временные признаки описывают общую статистическую структуру сигнала и хорошо отражают амплитудные изменения, наличие выбросов и импульсных процессов [9, 14, 10, 11].

Среднее значение сигнала:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n]. \quad (1)$$

Оно характеризует постоянную составляющую и общий уровень смещения сигнала относительно нуля. Дисперсия и стандартное отклонение:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \mu)^2, \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (2)$$

Эти характеристики показывают разброс значений относительно среднего и отражают общий уровень изменчивости колебаний.

Минимум и максимум сигнала:

$$x_{\min} = \min(x[n]), \quad x_{\max} = \max(x[n]). \quad (3)$$

Они позволяют оценить экстремальные отклонения сигнала.

Размах колебаний:

$$x_{pp} = x_{\max} - x_{\min}. \quad (4)$$

Этот показатель отражает полную амплитуду сигнала за интервал наблюдения.

Среднеквадратичное значение:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n]^2}. \quad (5)$$

Это одна из наиболее важных характеристик вибрации, так как она связана с энергией колебательного процесса.

Среднее по модулю:

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x[n]|. \quad (6)$$

Этот признак устойчивее к отдельным выбросам, чем RMS, и хорошо описывает средний уровень сигнала без учета знака.

Коэффициент асимметрии:

$$\gamma_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x[n] - \mu)^3}{\sigma^3}. \quad (7)$$

Он показывает асимметрию распределения амплитуд.

Коэффициент эксцесса:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x[n] - \mu)^4}{\sigma^4} - 3. \quad (8)$$

Он характеризует степень «пиковости» распределения и особенно полезен при обнаружении ударных процессов.

Энергия сигнала:

$$E = \sum_{n=1}^N x[n]^2. \quad (9)$$

Она отражает суммарную интенсивность вибрационных колебаний.

Дополнительно используются коэффициенты формы:

$$CF = \frac{\max |x[n]|}{RMS}, \quad IF = \frac{\max |x[n]|}{MAV}, \quad SF = \frac{RMS}{MAV}. \quad (10)$$

Эти показатели чувствительны к импульсным событиям, поэтому особенно полезны при раннем обнаружении подшипниковых дефектов [9, 10].

Признаки частотной области

Для частотного анализа вибрационного сигнала используется оценка спектральной плотности мощности по методу Уэлча [15]. Этот метод заключается в разбиении записи на перекрывающиеся фрагменты, вычислении спектров для каждого фрагмента и последующем усреднении. Такая схема даёт более устойчивую оценку спектра по сравнению с одной периодограммой, особенно при наличии шума.

На основе спектра вычисляются следующие признаки [12, 13, 14].

Спектральный центр тяжести:

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^M f_i P_i}{\sum_{i=1}^M P_i}. \quad (11)$$

Он показывает, в какой области частот сосредоточена основная энергия сигнала.

Спектральная ширина полосы:

$$B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (f_i - f_c)^2 P_i}{\sum_{i=1}^M P_i}}. \quad (12)$$

Этот признак показывает, насколько широко распределена энергия вокруг центра спектра.

Доминирующая частота: $f_{\max} = \operatorname{argmax}_{f_i} P_i$. (13)

Она соответствует частотному пику с максимальной мощностью.

Спектральная энтропия:

$$H_s = -\frac{1}{\log M} \sum_{i=1}^M p_i \log p_i, \quad p_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^M P_j}. \quad (14)$$

Этот признак характеризует степень упорядоченности спектра.

Частоты спектрального спада, например rolloff 85% и rolloff 95%, определяются как минимальные частоты, на которых накапливается заданная доля энергии спектра. Эти признаки показывают, до какой частоты сосредоточена основная часть спектральной энергии.

Признаки вейвлет-преобразования

Вейвлет-преобразование используется для анализа нестационарных сигналов, в которых диагностическая информация локализована во времени [5]. В отличие от Фурье-анализа, вейвлет-преобразование позволяет получать одновременно частотную и пространственную (временную) информацию, на каком именно участке записи возникает кратковременное возмущение и на каком масштабе оно проявляется.

Для дискретного разложения сигнал представляется через коэффициенты приближения и детализации. Именно коэффициенты детализации в наибольшей степени чувствительны к кратковременным ударам и локальным дефектам.

Для каждого уровня разложения вычисляется энергия [16, 17, 18]:

$$E_j = \sum_k d_j[k]^2 \quad (15)$$

а также нормированная доля энергии: $r_j = \frac{E_j}{\sum_m E_m}$. (16)

Энергия по уровням показывает, в каких масштабах сосредоточена основная часть сигнала. Если в сигнале присутствуют импульсные процессы, энергия на деталях возрастает.

Дополнительно используется энтропия распределения вейвлет-энергий [19]:

$$H_w = -\sum_j r_j \log r_j. \quad (17)$$

Этот признак отражает степень концентрации энергии между уровнями разложения.

В практической реализации применялось дискретное вейвлет-преобразование на нескольких уровнях с использованием базиса db4.

Классификатор Random Forest

В качестве классификатора выбран алгоритм Random Forest [6, 7, 8]. Он представляет собой ансамбль решающих деревьев, где каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и случайном подмножестве признаков, а итоговое решение принимается голосованием деревьев. Для нахождения наиболее информативных признаков сигнала в статье сравниваются четыре варианта входных данных: только временные признаки, только спектральные, временные вместе со спектральными и временной и спектральный набор, дополненный вейвлет-признаками [9, 5]. Такая постановка позволяет отдельно оценить вклад признаков в улучшение качества классификации. В этом же контексте Random Forest удобен тем, что сохраняет интерпретируемость: после обучения можно проанализировать важность признаков и определить, какие характеристики сигнала оказываются наиболее информативными для классификации состояния машины [7].

Описание стенда

Экспериментальные данные были получены на модульном испытательном стенде, предназначенном для моделирования вибрации, дисбаланса, смещения вала и дефектов подшипников качения [1]. Конструкция стенда позволяет формировать различные режимы

работы ротора и последовательно изменять параметры неисправностей, что делает его удобным для проверки теоретических положений, связанных с анализом вибрационных признаков.

Испытательный стенд включает электродвигатель, валопровод, роторный диск и опорные узлы с подшипниками качения. Благодаря модульному исполнению возможна установка дополнительных масс, имитирующих дисбаланс, а также создание условий для моделирования расцентровки и подшипниковых дефектов.

В качестве первичного преобразователя вибрации использовались датчики абсолютной вибрации VRMEMS-21, соответствующие требованиям ГОСТ ИСО 2954-2014, ГОСТ 30296–95, ГОСТ ИСО 10816-1-97 и ГОСТ ИСО 10816-3-2002 в части требований к средствам измерений [2, 20, 21, 22]. Датчики установлены на неподвижных частях агрегата, главным образом на опорах. Они относятся к инерционному типу и измеряют ускорение в точке крепления. Система сбора данных была построена на базе многофункционального контроллера, обеспечивающего опрос датчиков, цифровую обработку сигналов и передачу информации на рабочую станцию.

Обучение моделей и результаты эксперимента

Обучение проводилось на размеченной выборке, сформированной по результатам измерений вибрации на испытательном стенде. Перед обучением данные были преобразованы в матрицу признаков, где каждому сигналу соответствовал вектор временных, спектральных или вейвлет-характеристик [10, 5].

В качестве алгоритма классификации использовался Random Forest [7, 8]. Данный метод был выбран благодаря его способности работать с признаками различной природы. Кроме того, Random Forest позволяет вычислять информативность признаков, что важно для анализа вклада отдельных характеристик сигнала в классификацию состояния ротора [7]. В эксперименте использовалось 600 решающих деревьев, параметр максимального числа признаков для разбиения устанавливался как p , где p — общее количество признаков, а также применялся режим балансировки классов `class_weight='balanced'`, что снижало влияние неравномерности распределения данных по классам.

Для оценки качества моделей использовались следующие метрики: Accuracy (точность), Recall, Precision и F1-мера. Дополнительно строились матрицы ошибок и выполнялся анализ информативности признаков на основе критерия Джинни [6].

Модель, обученная на временных признаках

Первая модель строилась только на временных признаках. Она служила базовым вариантом и отражала, насколько далеко можно продвинуться в задаче классификации, используя исключительно статистическое описание вибросигнала.

Результаты, представленные в таблице 1, демонстрируют относительно умеренное качество распознавания: общая точность составила 79,55%. Наиболее сложные для классификации классы — горизонтальное и вертикальное смещение вала (F1-мера 0,51 и 0,67 соответственно). Это объясняется тем, что данные дефекты проявляются преимущественно в изменении фазовых соотношений и направленных компонент вибрации, которые слабо отражаются в скалярных временных статистиках. В то же время исправное состояние и дефекты подшипников распознаются с большей точностью благодаря выраженным изменениям амплитудных характеристик и наличию импульсных компонент.

Таблица 1

Результаты классификации только по временным признакам

Класс	Precision	Recall	F1-мера	Объём
Горизонтальное смещение вала	0.67	0.41	0.51	59
Дисбаланс	0.75	0.74	0.74	100
Исправное состояние	0.79	0.98	0.87	45
Дефекты подшипника в консольном положении	0.84	0.89	0.86	154
Дефекты подшипника в нависающем положении опоры	0.91	0.88	0.89	168
Вертикальное смещение вала	0.64	0.71	0.67	90
Точность (Accuracy)	0.7955			
Макро-среднее (macro avg)	0.76	0.77	0.76	616
Взвешенное среднее (weighted avg)	0.79	0.80	0.79	616

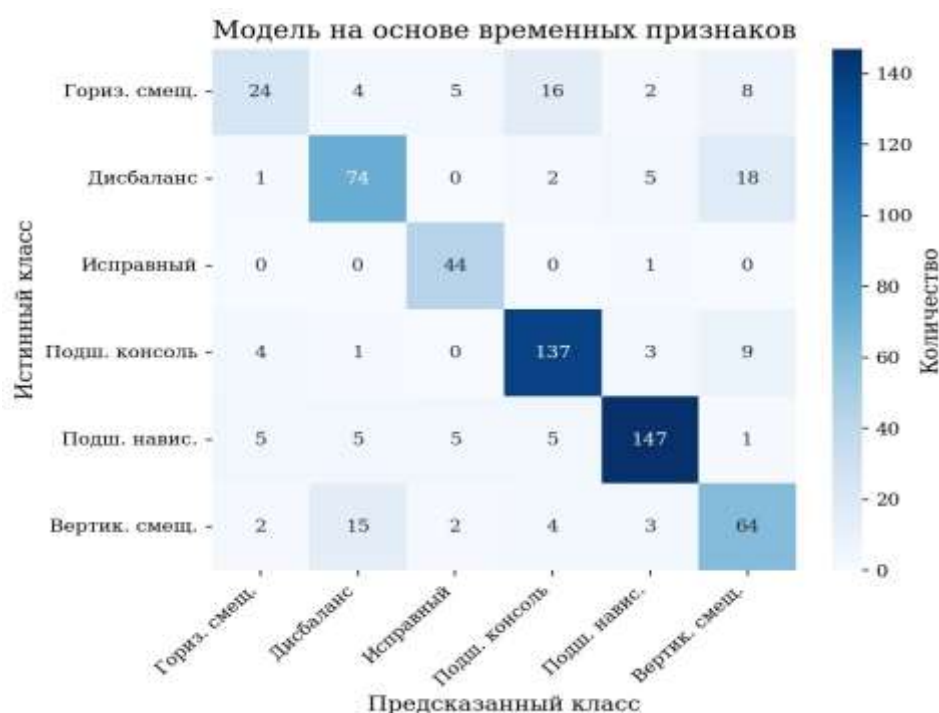


Рис. 1. Матрица ошибок для модели с временными признаками

Анализ матрицы ошибок (рис. 1) показывает, что основные ошибки заключаются в неверной классификации расцентровки и дисбаланса, что подтверждает гипотезу о недостаточной информативности временных признаков для различия дефектов со схожей амплитудной динамикой.

Модель, обученная на спектральных признаках

Вторая модель использовала для обучения только спектральные характеристики. Это позволило учитывать перераспределение энергии по частотам, которое характерно для дисбаланса, расцентровки и дефектов подшипников.

Как видно из таблицы 2, использование частотных признаков привело к росту качества: общая точность увеличилась до 87,18%. Улучшилось распознавание горизонтального смещения вала (F1-мера выросла с 0,51 до 0,83), поскольку данный дефект проявляется в виде характерных гармоник на частоте вращения и её кратных.

Таблица 2

Результаты классификации только по спектральным признакам

Класс	Precision	Recall	F1-мера	Объём
Горизонтальное смещение вала	0.92	0.76	0.83	59
Дисбаланс	0.75	0.82	0.78	100
Исправное состояние	0.94	0.98	0.96	45
Дефекты подшипника в консольном положении	0.91	0.90	0.90	154
Дефекты подшипника в нависающем положении опоры	0.95	0.92	0.93	168
Вертикальное смещение вала	0.77	0.82	0.80	90
Общая точность (Accuracy)	0.8718			
Макро-среднее (macro avg)	0.87	0.87	0.87	616
Взвешенное среднее (weighted avg)	0.88	0.87	0.87	616

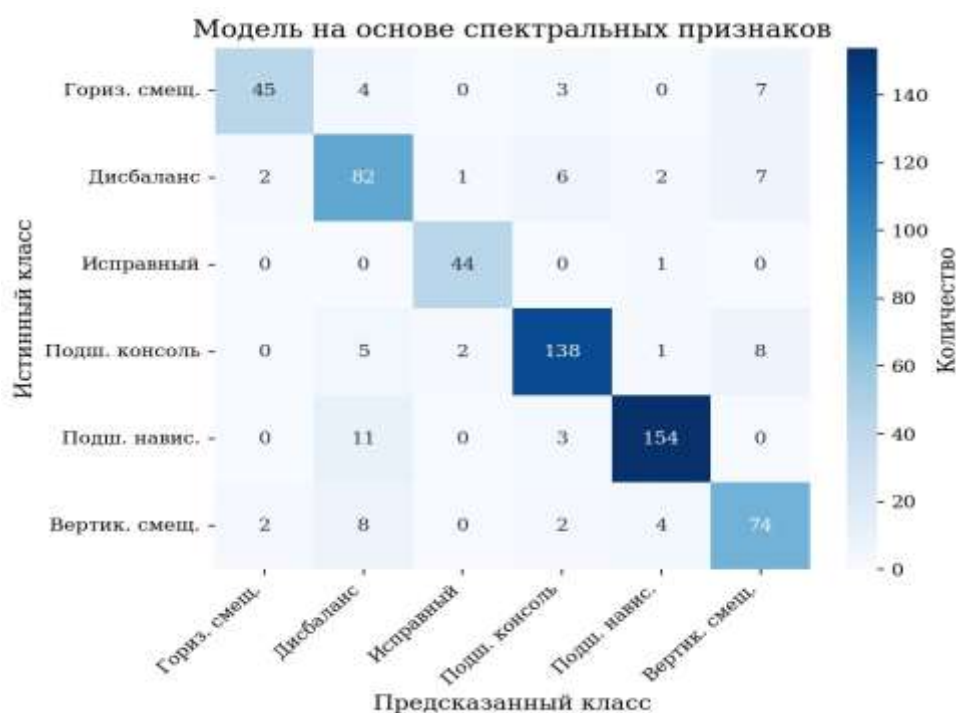


Рис. 2. Матрица ошибок для модели со спектральными признаками

На рис. 2 видно, что спектральные признаки эффективно разделяют классы с выраженной гармонической структурой, однако остаются ошибки в различении вертикального смещения и дисбаланса, что указывает на необходимость учёта нестационарных компонент сигнала.

Модель, обученная на временных и спектральных признаках

Третья модель была обучена на комбинации временных и спектральных признаков. Комбинирование двух типов признаков повысило общую точность до 90,58% (табл. 3).

Наблюдается улучшение по всем классам: минимальное значение F1-меры составило 0,82 для вертикального смещения, что на 15 процентных пунктов выше по сравнению с моделью, обученной только на временных признаках. Особенно важно, что комбинация признаков позволила исключить ложные срабатывания на исправном состоянии (Precision и Recall — 0,98).

Таблица 3

Результаты классификации по временным и спектральным признакам

Класс	Precision	Recall	F1-мера	Объём
Горизонтальное смещение вала	0.92	0.80	0.85	59
Дисбаланс	0.83	0.85	0.84	100
Исправное состояние	0.98	0.98	0.98	45
Дефекты подшипника в консольном положении	0.92	0.95	0.94	154
Дефекты подшипника в нависающем положении опоры	0.95	0.97	0.96	168
Вертикальное смещение вала	0.83	0.81	0.82	90
Общая точность (Assuarcy)	0.9058			
Макро-среднее (macro avg)	0.91	0.89	0.90	616
Взвешенное среднее (weighted avg)	0.91	0.91	0.91	616

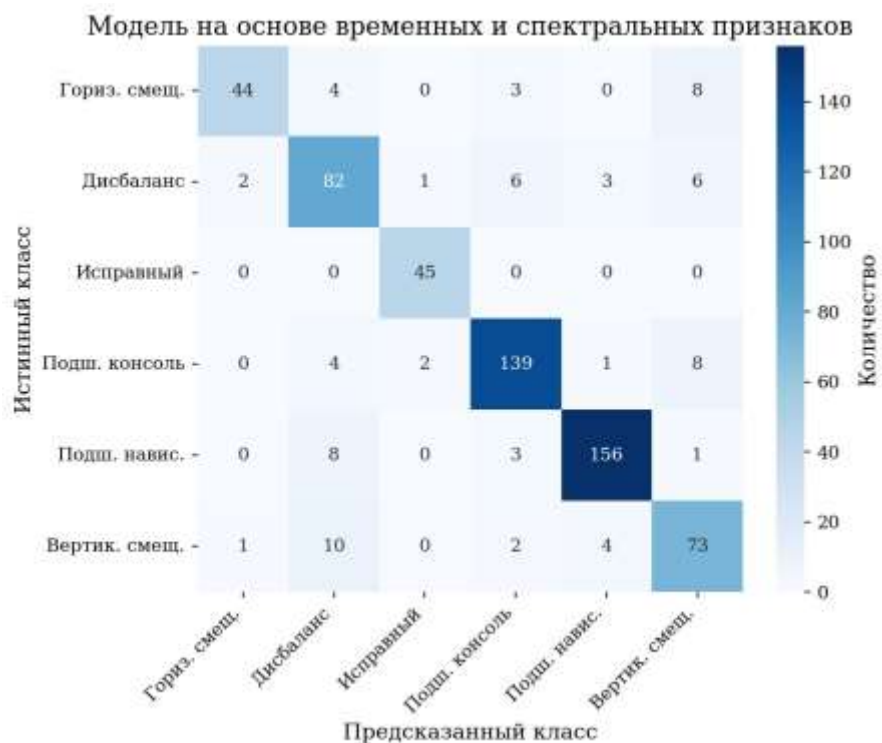


Рис. 3. Матрица ошибок для модели с временными и спектральными признаками

Матрица ошибок на рис. 3 показывает, что добавление временных и спектральных признаков существенно повышает качество распознавания, однако полностью исключить

ошибки классификации не удаётся. Основные затруднения сохраняются при разделении близких по физической природе состояний, прежде всего дисбаланса и расцентровки. Это указывает на то, что для дальнейшего повышения точности требуется более детальное частотно-временное описание сигнала, в частности с использованием вейвлет-признаков.

Модель, обученная с добавлением вейвлет-признаков

Четвёртая модель в обучение включала вейвлет-признаки. Для вейвлет-разложения выбрали базис Добеши четвертого порядка (db4) и провели декомпозицию на три уровня, что позволило выделить компоненты в диапазоне частот, соответствующих характерным частотам дефектов подшипников и модуляционным эффектам.

Результаты, представленные в таблице 4, показывают исключительное качество классификации: общая точность достигла 99,84%, а по пяти из шести классов метрики Precision, Recall и F1-мера равны 1,00.

Таблица 4

Результаты классификации по всем признакам (временные, спектральные и вейвлет)

Класс	Precision	Recall	F1-мера	Объём
Горизонтальное смещение вала	1.00	1.00	1.00	59
Дисбаланс	1.00	0.99	0.99	100
Исправное состояние	1.00	1.00	1.00	45
Дефекты подшипника в консольном положении	1.00	1.00	1.00	154
Дефекты подшипника в нависающем положении опоры	0.99	1.00	1.00	168
Вертикальное смещение вала	1.00	1.00	1.00	90
Общая точность (Accuracy)	0.9984			
Макро-среднее (macro avg)	1.00	1.00	1.00	616
Взвешенное среднее (weighted avg)	1.00	1.00	1.00	616



Рис. 4. Матрица ошибок для модели со всеми типами признаков

Рассмотрим наиболее важные признаки по оценке алгоритма Random Forest в этой модели.

Таблица 5

Топ-10 наиболее важных признаков по оценке алгоритма Random Forest

№	Признак	Важность
1	Канал 2: энергия вейвлет-коэффициентов 3-го уровня	0.051958
2	Канал 3: доля энергии вейвлет-коэффициентов 1-го уровня	0.038450
3	Канал 6: энергия вейвлет-коэффициентов 3-го уровня	0.035050
4	Канал 6: частота спектрального спада 85%	0.034579
5	Канал 4: энергия вейвлет-коэффициентов 3-го уровня	0.031629
6	Канал 3: доля энергии вейвлет-коэффициентов 2-го уровня	0.029577
7	Канал 3: доля энергии вейвлет-коэффициентов 3-го уровня	0.025137
8	Канал 5: энергия вейвлет-коэффициентов 2-го уровня	0.024953
9	Канал 5: энергия вейвлет-коэффициентов 1-го уровня	0.022535
10	Канал 4: энергия вейвлет-коэффициентов 2-го уровня	0.021933

По таблице 5 видно, что наиболее информативными оказались вейвлет-признаки. Это означает, что модель лучше всего распознаёт не общий уровень вибрации, а локальные нестационарные изменения сигнала и перераспределение энергии по масштабам и частотам. Информативность вейвлет-признаков обусловлена выделением кратковременные импульсов и изменения структуры вибрации, которые характерны для дефектов ротора и подшипников.

Вывод

Последовательное добавление типов признаков демонстрирует монотонный рост качества:

- только временные признаки – 79,55;
- только спектральные – 87,18;
- временные + спектральные – 90,58;
- все признаки с добавлением вейвлет-анализа – 99,84.

При этом наиболее значимый скачок наблюдается именно при переходе к вейвлет-анализу, что подтверждает гипотезу о ключевой роли частотно-временного представления для диагностики нестационарных процессов в роторных машинах.

Для наглядной оценки результатов строились матрицы ошибок. Они позволяют увидеть, какие классы наиболее сложные для классификации. Это особенно важно для вибродиагностики, так как некоторые дефекты имеют близкие проявления в сигналах и различаются только по совокупности признаков. Анализ матрицы ошибок дополняется оценкой важности признаков, что помогает определить, какие характеристики сигнала оказываются наиболее полезными при принятии решения.

Следует отметить, что столь высокая точность во многом обусловлена контролируемым характером экспериментальных данных, полученных на стенде при моделировании

ограниченного набора дефектов. В таких условиях диагностические классы обладают выраженными различиями, а вейвлет-признаки оказываются особенно чувствительными к локальным импульсным и нестационарным компонентам вибрации, что и обеспечивает высокое качество распознавания.

По итогам эксперимента можно сделать вывод, что применение Random Forest в сочетании с комплексом информативных признаков с использованием вейвлет-преобразованием является перспективным подходом для автоматизированной вибродиагностики роторных машин. Такой метод обеспечивает не только классификацию состояний, но и возможность анализа структуры признакового пространства, что повышает интерпретируемость результатов и практическую ценность модели.

Список литературы

1. Robert B. Randall and J'ер'ome Antoni. Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2):485–520, 2011.
2. Стандартинформ. ГОСТ ИСО 2954–2014. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Общие требования, 2014.
3. Robertas Uselis, Artur̄as Serackis, and Raimondas Pomarnacki. Signal processing optimization in̄ resource-limited IoT for fault prediction in rotating machinery. *Electronics*, 14(18):3670, 2025.
4. Ratna Dahiya. A comparative study of FFT, STFT and wavelet techniques for induction machine fault diagnostic analysis. In *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics (CIMMACS '08)*, pages 203–208, Cairo, Egypt, 2008. World Scientific and Engineering Academy and Society.
5. Y. Wei, Y. Li, M. Xu, and W. Huang. A review of early fault diagnosis approaches and their applications in rotating machinery. *Entropy*, 21(4):409–435, April 2019.
6. Leo Breiman. Random forests. *Machine Learning*, 45(1):5–32, 2001.
7. Qin Hu, Xiao-Sheng Si, Qing-Hua Zhang, and Ai-Song Qin. A rotating machinery fault diagnosis method based on multi-scale dimensionless indicators and random forests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139:106609, 2020.
8. Te Han, Dongxiang Jiang, Qi Zhao, Lei Wang, and Kai Yin. Comparison of random forest, artificial neural networks and support vector machine for intelligent diagnosis of rotating machinery. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(8):2681–2693, 2018.
9. V. Vakharia, V. K. Gupta, and P. K. Kankar. A comparison of feature ranking techniques for fault diagnosis of ball bearing. *Soft Computing*, 20(4):1601–1619, April 2016.
10. B. R. Nayana and P. Geethanjali. Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal. *IEEE Sensors Journal*, 17(17):5618–5625, September 2017.
11. N. BR and P. Geethanjali. Feature extraction for bearing fault diagnosis in noisy environment: A study. In *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, volume 1, pages 1–5, March 2019.
12. P. Arun, S. Abraham Lincon, and N. Prabhakaran. Detection and characterization of bearing faults from the frequency domain features of vibration. *IETE Journal of Research*, 64(5):634–647, 2018.
13. Y. Yuan, C. Chen, and Y. Yuan. Fault detection of rolling bearing based on principal component analysis and empirical mode decomposition. *AIMS Mathematics*, 5(6):5916–5938, 2020.
14. J. Vargas-Machuca, F. Garcia, and A. M. Coronado. Detailed comparison of methods for classifying bearing failures using noisy measurements. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(3):744–754, June 2020.
15. M. H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. John Wiley & Sons, 1996.
16. Xiaobang Zhang and Yong Lu. Wavelet energy features for damage identification: Sensitivity to measurement uncertainties. In *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-10)*, volume 198 of *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham, 2022.
17. W. Fan and P. Qiao. Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10(1):83–111, 2011.
18. M. P. Limongelli and V. Carvelli. Damage localization in a glass fiber reinforced composite plate via the surface interpolation method. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 628, page 012095. IOP Publishing, 2015.
19. W. X. Ren, Z. S. Sun, Y. Xia, H. Hao, and A. J. Deeks. Structural damage identification by using wavelet entropy. *Engineering Structures*, 30(10):2840–2849, 2008.
20. Госстандарт России. ГОСТ 30296–95. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Общие требования, 1995.

21. Госстандарт России. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования, 1997.
22. Госстандарт России. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹, 2002.

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ АУДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ЕРЕМЕНКО Е.А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Рассматривается задача классификации медицинских аудиосигналов, представленных записями сердечных звуков. Для формирования признакового описания используется дискретное вейвлет-преобразование. По вейвлет-коэффициентам рассчитываются энергия, относительная энергия и энтропия. Классификация выполняется с использованием SVM и Random Forest. Эксперимент проведён на HeartSounds Dataset B. Показано, что DWT-признаки дают прирост macro-F1 по сравнению с признаками во временной области, однако качество классификации остаётся ограниченным из-за дисбаланса классов.

Ключевые слова: медицинские аудиосигналы, сердечные звуки, дискретное вейвлет-преобразование, машинное обучение, SVM, Random Forest, macro-F1.

Введение

Автоматизированная обработка медицинских аудиосигналов является актуальной задачей на стыке цифровой обработки сигналов и машинного обучения. Одним из примеров таких данных являются записи сердечных звуков. Они представляют собой нестационарные временные сигналы, в которых информативные участки могут иметь различную длительность, появляться в разные моменты времени и проявляться на разных частотных масштабах.

Для анализа таких сигналов недостаточно использовать только простые статистические характеристики амплитуды. Необходимо признаковое описание, способное учитывать локальные изменения структуры сигнала. Одним из подходов к решению этой задачи является дискретное вейвлет-преобразование, позволяющее представить сигнал через коэффициенты разных уровней разложения.

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка алгоритмической схемы классификации медицинских аудиосигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования и алгоритмов машинного обучения.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовалась размеченная часть HeartSounds Dataset B. В экспериментальную выборку вошла 461 аудиозапись трёх классов: normal, murmur и extrastole. Распределение классов является несбалансированным: класс normal содержит 320 записей, murmur — 95 записей, extrastole — 46 записей.

Перед извлечением признаков все аудиосигналы приводились к единой длине 16384 отсчёта при частоте дискретизации 4000 Гц. Если запись была короче заданной длины, она дополнялась нулями. Если запись была длиннее, из неё выделялся центральный фрагмент. После этого выполнялась нормализация амплитуды по максимальному абсолютному значению.

Основной вариант признакового описания строился на основе дискретного вейвлет-преобразования. Использовался фиксированный уровень разложения $L = 6$. В результате каждый сигнал представлялся семью наборами коэффициентов: A6, D6, D5, D4, D3, D2, D1. По каждому набору коэффициентов рассчитывались три характеристики: энергия, относительная энергия и энтропия. Таким образом, для каждого сигнала формировался признаковый вектор размерности 21.

В эксперименте сравнивались девять вейвлет-базисов: db4, db6, db8, sym4, sym6, sym8, coif2, coif4, coif6. Для классификации использовались два алгоритма машинного обучения: метод опорных векторов и случайный лес. Для контрольного сравнения также был сформирован набор из 11 признаков, рассчитанных непосредственно во временной области сигнала.

Оценка качества выполнялась с использованием стратифицированной 5-блочной кросс-валидации. Из-за дисбаланса классов основной метрикой была выбрана макро-F1, поскольку она учитывает качество классификации каждого класса независимо от его численности. Дополнительно анализировались precision, recall и матрицы ошибок.

Результаты

Лучший результат среди прямых трёхклассовых моделей был получен для SVM с DWT-признаками на основе вейвлета coif4. Значение макро-F1 составило 0.4732. Для Random Forest наилучший результат по макро-F1 был получен при использовании вейвлета db8 и составил 0.4401.

При этом Random Forest показал более высокую общую долю правильных ответов, однако анализ матрицы ошибок выявил, что модель не распознала класс extrastole. Это подтверждает, что ассигасу не может использоваться как основной показатель качества при несбалансированном распределении классов.

Сравнение DWT-признаков с признаками во временной области показало преимущество вейвлет-представления. Для SVM значение макро-F1 увеличилось с 0.3976 до 0.4732, для Random Forest — с 0.4051 до 0.4401. Следовательно, распределение энергии и энтропии по уровням вейвлет-разложения содержит информацию, полезную для классификации сердечных аудиосигналов.

Дополнительно были рассмотрены бинарные постановки задачи. В задаче normal / abnormal значение макро-F1 составило 0.65, однако recall класса abnormal оказался равен 0.32. Это означает, что модель пропускает значительную часть записей с отклонениями. В задаче murmur / extrastole без участия класса normal значение макро-F1 составило 0.73. Однако полная двухэтапная схема normal / abnormal → murmur / extrastole не улучшила итоговое качество трёхклассовой классификации, поскольку первый этап недостаточно хорошо отделял записи с отклонениями от нормальных записей.

Заключение

В результате исследования была построена алгоритмическая схема классификации медицинских аудиосигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования и методов

машинного обучения. Эксперимент показал, что DWT-признаки повышают macro-F1 по сравнению с признаками, рассчитанными во временной области.

Наилучшим основным вариантом стала прямая трёхклассовая классификация с использованием SVM и DWT-признаков на основе вейвлета coif4. Вместе с тем полученное качество классификации остаётся ограниченным, особенно для малочисленного класса extrastole. Поэтому предложенный подход следует рассматривать как исследовательскую схему, а не как готовое медицинское диагностическое решение.

Дальнейшее развитие работы может быть связано с расширением и балансировкой выборки, выделением сердечных циклов, подбором дополнительных признаков, настройкой моделей и проверкой результатов на независимых данных.

Список литературы

1. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2015.
2. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учебное пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2003. — 104 с.
3. Лавров С. А. Разработка устойчивых методов реконструкции изображений с применением вейвлет-преобразования: дис. ... канд. техн. наук. — Снежинск: Снежинский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, 2012. — 122 с.
4. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. — Philadelphia: SIAM, 1992. — 357 p.
5. Mallat S. A. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way. — 3rd ed. — Amsterdam: Academic Press, 2009. — 832 p.
6. Gomes E. F., Bentley P. J., Pereira E., Coimbra M. T., Deng Y. Classifying Heart Sounds: Approaches to the PASCAL Challenge // Proceedings of the International Conference on Health Informatics. — 2013. — P. 337–340.
7. Cortes C., Vapnik V. Support-Vector Networks // Machine Learning. — 1995. — Vol. 20, № 3. — P. 273–297.
8. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, № 1. — P. 5–32.
9. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. — 2011. — Vol. 12. — P. 2825–2830.

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

ИБАТОВ Н.Э.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Рассматривается задача планирования траекторий в многоагентных системах в условиях частичной наблюдаемости. Предложен алгоритм на основе глубокого Q-обучения с некоторыми улучшениями: градиентным масштабированием, механизмом ожидания, шестиканальное наблюдение с картой посещений и потенциальным формированием награды. Эксперименты на среде 2D на 20 клеток с 10 агентами демонстрируют полное достижения целей в 55% случаях, что в 2.2 раза выше классического алгоритма A* (25%) и на 93% снижает число столкновений между агентами. Результаты подтверждают эффективность предложенных улучшений.

Ключевые слова: многоагентное обучение с подкреплением, глубокое Q-обучение, планирование траекторий, независимое обучение, координация агентов.

Введение

Современное развитие автономных систем — логистических роботов, автоматизированных транспортных средств, управлением персонажами в играх — требует эффективных методов координации множества агентов, взаимодействующих между собой в общем пространстве. Задача планирования траектории в многоагентных системах (Multi-

Agent Path Finding, MAPF) заключается в построение непересекающихся путей для каждого агента от начальной позиции агента до его цели, путем обхода препятствий и предотвращения столкновений с другими агентами.

Классические алгоритмы, такие как A^* и его модификации, демонстрируют высокую эффективность в статических сценариях с полной информацией об окружении, однако они плохо адаптируются к динамическим препятствиям в виде других агентов и имеют экспоненциальную вычислительную сложность. Методы обучения с подкреплением, в частности глубокое Q-обучение (Deep Q-Learning, DQL) [2], позволяют агентам обучаться эффективному поведению на основе опыта взаимодействия со средой.

В многоагентном случае независимое Q-обучение (Independent Deep Q-Learning, IDQL) [1] является наиболее простым и легко масштабируемым подходом, при котором каждый агент обучает собственную Q-сеть, рассматривая других агентов как часть среды. Однако IDQL имеет несколько проблем: нестационарность, разреженность наград и отсутствие координации, что приводит к низкой успешности достижения целей в сложных сценариях.

Целью данной работы направлена на повышение эффективности планирования траекторий в многоагентных системах с помощью улучшения алгоритма IDQL. Исходя из анализа недостатков базового IDQL, предлагаются несколько улучшений, направленные на стабилизацию обучения и эффективную координацию агентов.

Постановка задачи

Задача формализуется как частично наблюдаемая марковская игра (Partially Observable Markov Game, POMG), задаваемая кортежем

$$G = \langle S, A^1, \dots, A^n, P, R^1, \dots, R^n, O^1, \dots, O^n, Z, \gamma \rangle,$$

где S – множество состояний, A^i – множество действий агента i , $P(s' | s, a^1, \dots, a^n)$ – функция перехода, $R^i(s, a^i, s')$ – функция награды, O^i – множество наблюдений, Z – функция наблюдения, $\gamma \in [0, 1]$ – коэффициент дисконтирования.

В рассматриваемой постановке:

- Среда представляется дискретной сеткой W на H с препятствиями;
- Каждый агент i имеет начальную позицию s_i^0 и целевую позицию g_i ;
- На каждом шаге агент выбирает одно из пяти действий: вверх, вниз, влево, вправо или остаться на месте;
- Наблюдение агента ограничено локальной областью радиуса R (в работе $R = 4$);
- Агенты не могут сталкиваться или обмениваться местами.

Целью является максимизировать ожидание дисконтированной суммы наград для каждого агента:

$$J^i(\pi^i) = E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R^i(s_t, a_t^i, s_{t+1}) \right]. \quad (1)$$

Предложенный алгоритм

Базовым алгоритмом является независимое глубокое Q-обучение, где Q-функция агента i аппроксимируется нейронной сетью $Q^i(s, a; \theta^i)$. Обновления параметров производится по градиенту функции потерь:

$$L^i(\theta^i) = E_{[(s,a,r,s') \sim D^i]} \left[\left(r + \gamma * \max_{\{a\}} \left(Q^i(s', a'; \bar{\theta}^i) - Q^i(s, a; \theta^i) \right) \right)^2 \right], \quad (2)$$

Для решения проблемы базового IDQL предложен комплекс улучшений, представленных ниже.

Архитектура нейронной сети с вниманием

Входные данные содержат наблюдение по шести каналам: стены, другие агенты, цель, собственная позиция, направление к цели и карта посещений. Размер наблюдения – 6*9*9. Архитектура нейронной сети включает свёрточные слои с батч-нормализацией, блоки пространственного и канального внимания, а также полносвязные слои.

Пространственное внимание:

$$A_{spatial}(x) = x \odot \sigma \left(Conv_2(D(x)) \right), \quad (3)$$

где σ – сигмоидная функция.

Внимание по каналамх:

$$A_{channel}(x) = x \odot \sigma \left(MLP(AvgPool(x)) + MLP(MaxPool(x)) \right). \quad (4)$$

Градиентное масштабирование

В отличие от стандартного градиентного клиппинга, предложен метод адаптивного масштабирования:

$$g_{scaled} = g * \left(\frac{\eta}{\|g\| + \epsilon} \right), \quad (5)$$

где $\eta = 1.0$ – целевая норма градиента. Подход сохраняет направление градиента и плавно регулирует величину обновлений.

Механизм ожидания.

При конфликте агент, который не может занять желаемую клетку, остается на своем месте, получая штраф $-0.1 * \tau$, где τ – время ожидания.

Алгоритм решения конфликтов:

1. Вычисление желаемых позиций всех агентов
2. Выявление конфликтов
3. Перемещение агентов без конфликтов
4. Ожидание конфликтующих агентов с проверкой на то, что клетка освободилась

Функция награды

Полная награда агента i на шаге t :

$$R_{total}^i(t) = R_{goal}^i(t) + R_{step}^i(t) + R_{coll}^i(t) + R_{swap}^i(t) + R_{wait}^i(t) + F(s_t, a_t^i, s_{t+1}), \quad (6)$$

где:

- $R_{goal}^i(t)$ – награда за достижение цели;
- $R_{step}^i(t)$ – штраф за шаг;
- $R_{coll}^i(t)$ – штраф за столкновение;
- $R_{swap}^i(t)$ – штраф за обмен местами;
- $R_{wait}^i(t)$ – штраф за ожидание.

Потенциальное формирование наград [3];

$$F(s, a, s') = \Phi(s') - \Phi(s), \quad (7)$$

$$\Phi(s) = -\frac{d(s)}{D_{max}}, \quad (8)$$

где $d(s)$ – расстояние до цели (BFS), D_{max} – максимальная длина оптимального пути.

$$F(s, a, s') = \frac{d(s) - \gamma d(s')}{D_{max}}. \quad (9)$$

Экспериментальные результаты

Обучение проводилось на среде 20 на 20 клеток с 10 агентами.

Параметры:

$$\alpha = 10^{-4},$$

$$batch\ size = 1024,$$

$$\epsilon_{decay} = 0.998,$$

$$\epsilon_{min} = 0.15.$$

Характеристики: GPU NVIDIA RTX 3070Ti Super 16GB, RAM – 32GB.

Полный цикл обучения (3000 эпизодов) занял примерно 7-8 часов.

Базовый IDQL обучен в тех же условиях. Результаты сравнения с Independent A* [4] представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение методов на среде 20 на 20 с 10 агентами

Метод	Успешность	Столкновения	Длина пути	Время, мс
Independent A*	0.25	252.9	81.2	1.95
Базовый IDQL	0.00	543.8	100.0	1052
Разработанный	0.55	18.6	71.6	917

Разработанный алгоритм превосходит Independent A* в 2.2 раза по успешности (55% против 25%). Число столкновений снижено на 93% (18.6 против 252.9). Длина пути сокращена на 13% (71.6 против 81.2). Базовый IDQN неспособен решить задачу (0%), что подтверждает необходимость предложенных улучшений.

Заключение

В работе предложен алгоритм планирования траекторий в многоагентных системах на основе IDQL с комплексом улучшений: градиентное масштабирование, механизм ожидания, шестиканальное наблюдение с картой посещений и потенциальное формирование наград.

Экспериментальные данные подтверждают эффективность данного подхода:

- Успешность = 55% на среде 20 на 20 с 10 агентами (в 2.2 раза выше A*);
- Снижение столкновений на 93% (18.6 вместо 252.9);
- Сокращение длины пути на 13% (с 81.2 до 71.6);
- Стабилизация обучения: loss снижен на 99.8% за 1500 эпизодов.

Базовый IDQN не справляется с решением данной задачи (0%), что доказывает необходимость улучшений. Алгоритм может быть применен в логистике, групповом управлении персонаже и других системах, требующих децентрализованного планирования.

Список литературы

1. Tan M. (2003). Multi-agent reinforcement learning: Independent vs. cooperative agents. ICML. doi:10.1016/b978-1-55860-307-3.50049-6
2. Mnih V., et al. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. Nature, 518, 529-533, doi:10.1038/nature14236
3. Ng A.Y., Harada D., Russell S. (1999). Policy invariance under reward transformations: Theory and application to reward shaping. Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning. Bled, Slovenia: Morgan Kaufmann.
4. R. Stern, N. Sturtevant, A. Felner, S. Koenig, H. Ma, T. Walker, J. Li, D. Atzmon, L. Cohen, T. Kumar et al. (2019). Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks. Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search, 10(1), 151–158. doi:10.1609/socs.v10i1.18510

БЫСТРОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ФОРМ

ИВАНОВ С.К.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе рассматривается задача ускоренного вычисления нормальных форм полиномов в факторалгебрах. В нульмерном случае используется представление факторалгебры с помощью бордер-базиса и матриц умножения, что позволяет свести вычисление нормальной формы к вычислению полинома от коммутирующих линейных операторов. Для уменьшения числа операций применяются многомерные схемы Горнера и жадное вынесение общих мономиальных делителей. Для ненульмерного случая предложена адаптация на основе адаптивного расширения кэша редукций. Проведено экспериментальное сравнение с прямой редукцией по базису Грёбнера по структурной метрике стоимости и по фактическому времени исполнения. На рассмотренных семействах примеров бордер-базисный подход показывает устойчивое преимущество при повторных вычислениях и на достаточно сложных входных полиномах.

Ключевые слова: бордер-базис, базис Грёбнера, нормальная форма, схема Горнера, нульмерный идеал, ненульмерный идеал, фактор-алгебра.

Постановка задачи

Пусть $\mathbb{K}[x] = \mathbb{K}[x_1, x_2, \dots, x_n]$, $I \subset \mathbb{K}[x]$ — идеал. Для нульмерного идеала фактор-алгебра $\mathbb{K}[x]/I$ конечномерна, и нормальная форма полинома может быть вычислена через бордер-базис и соответствующие матрицы умножения M_{x_i} . При этом для любого полинома $f \in \mathbb{K}[x]$ справедливо

$$\pi(f) = f(M_{x_1}, \dots, M_{x_n})(1),$$

где π — каноническая проекция на $\mathbb{K}[x]/I$, а под подстановкой матриц в полином имеется в виду формальная подстановка матрицы M_{x_i} вместо x_i . То есть задача вычисления нормальной формы сводится к вычислению полинома от коммутирующих операторов. Для оптимального решения поставленной задачи предлагается оптимизация, основанная на многомерной схеме Горнера.

В ненульмерном случае глобальный базис фактор-алгебры, вообще говоря, бесконечен, поэтому предлагается вычислять только те элементы бордер-базиса, которые

действительно необходимы для вычисления. Вычисленные значения записываются в кэш

$\mathcal{C}$, который представляет из себя частичный оператор

$$\mathcal{C}: 1, \dots, n \times \mathcal{O} \rightarrow \text{span}(\mathcal{O}): \quad \mathcal{O} = T_i(\mathcal{O}) = \text{Nf}(x_i \mathcal{O}),$$

где T_i — оператор умножения на переменную x_i :

$$T_i = \begin{cases} x_i \mathcal{O}, & x_i \mathcal{O} \in \mathcal{O} \\ \text{Nf}(x_i \mathcal{O}), & x_i \mathcal{O} \in \partial \mathcal{O}, \end{cases}$$

что является прямым аналогом матрицы умножения в нульмерном случае.

Экспериментальный анализ

В экспериментах сравнивались не полные процессы, включающие предварительные вычисления, а только этапы нахождения нормальных форм: бордер-базисный метод с матрицами умножения и схемой Горнера сопоставлялся с прямой редукцией по базису Грёбнера. Для сравнения использовалась агрегированная структурная метрика

$$C_{\text{main}} = C_{\text{coeff}} + C_{\text{sparse}} + C_{\text{ctrl}} \quad (1)$$

а также фактическое время исполнения T_{exec} .

На семействе почти мономиальных нульмерных идеалов над полем

$\mathbb{GF}(27644437)$ в первой серии было рассмотрено 10 алгебр, для каждой из которых генерировалось по 10000 случайных разреженных полиномов. В среднем бордер-базисный метод потреблял около 41.8% стоимости прямой редукции по основной метрике. Средние

времена составили $T_{\text{border}} \approx 0.908$ мс и $T_{\text{grob}} \approx 2.964$ мс; бордер-базисный метод оказался быстрее в 90% алгебр и в 99.55% отдельных запусков. Результаты представлены на рис. 1.

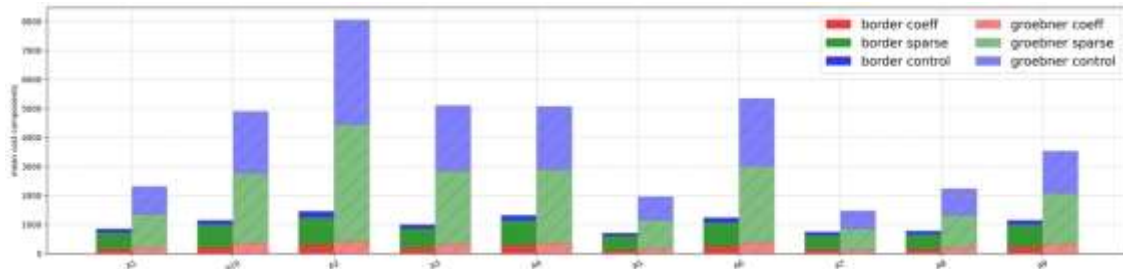


Рис. 1. Средняя стоимость по алгебрам

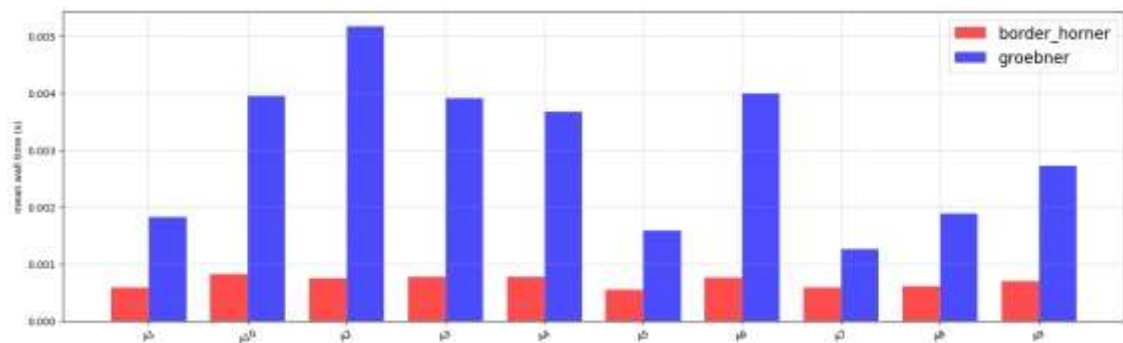


Рис. 2. Среднее время исполнения по алгебрам

Отдельный эксперимент по сложности показал, что на простых входах бордер-базисная схема не успевает окупить собственные накладные расходы. Однако с ростом степени входного полинома и размера его носителя преимущество бордер-базисного метода становится систематическим. Аналогичное поведение наблюдается и по фактическому времени исполнения.

Дополнительный эксперимент строится следующим образом: в пространстве

$$(d, s) = (\deg(f), |\text{supp}(f)|).$$

Перебираются степени входных полиномов и размеры носителя по возрастанию в рамках фиксированной достаточно сложной конечномерной алгебры. Полученные графики (рис. 3, рис. 4) сложности (1) и времени исполнения являются демонстрацией зависимости трудоемкости алгоритма от структурных параметров полиномов.

Интерпретация результатов должна быть не локальной, а структурной. Выводы строятся не на абсолютном уровне кривых, а на их формах. При переходе к усреднению, меняется прежде всего вертикальный масштаб, тогда как качественный характер

зависимостей — рост стоимости с увеличением d и s , более резкий рост для прямой редукции, а также расширение области выигрыша бордер-базисного метода — сохраняется.

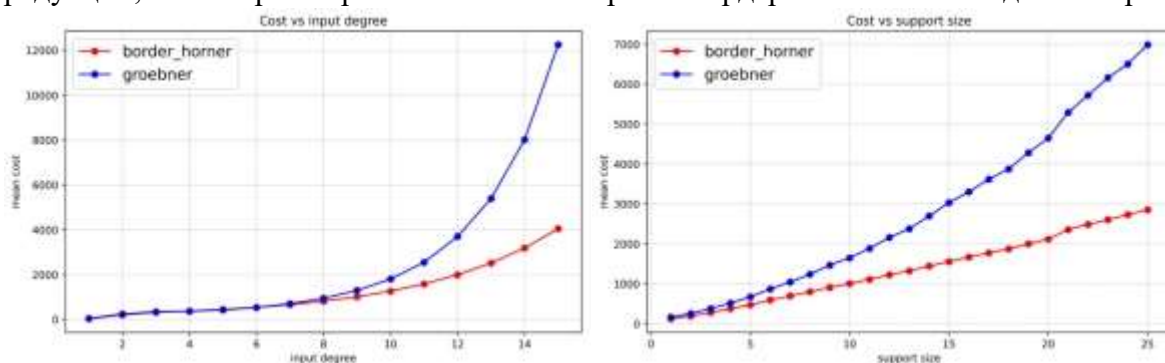


Рис. 3. Трудоемкость как функция степени входа (слева) и размера носителя (справа)

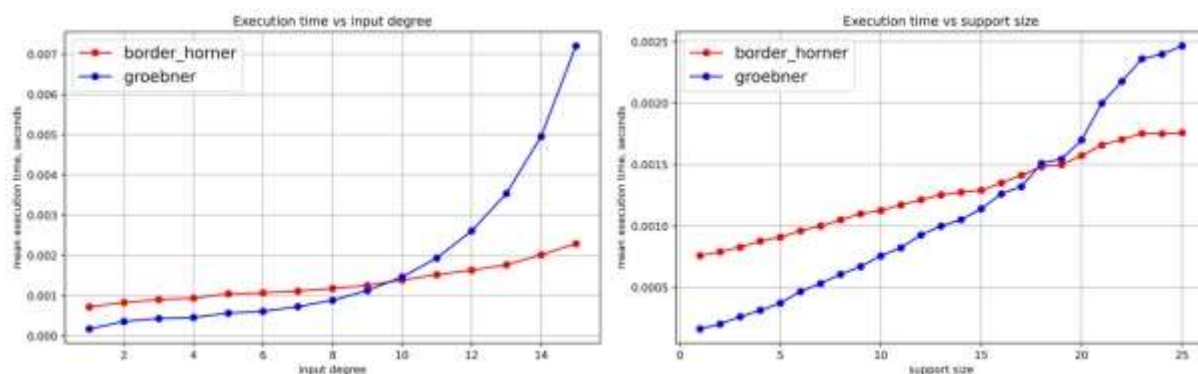


Рис. 4. Время исполнения как функция степени входа (слева) и размера носителя (справа)

Важно отметить, что бордер-базисный алгоритм особенно эффективен для решения массовых задач в рамках известной структуры (конкретной алгебры), что и продемонстрировали эксперименты. Это связано с тем фактом, что алгоритм, основанный на базе Гребнера, сложным образом зависит от входного полинома, то есть количество редукций пусть и конечно, но может быть сколь угодно велико. В то же время трудоемкость редукции с использованием матриц умножения детерминированным образом зависит от сложности самого полинома: все структурные сложности отбрасываются на уровне

препроцессинга (построения бордер-базиса и матриц умножения), пусть даже препроцессинг может быть достаточно ресурсоемким в то время, как количество умножений не превосходит сумму степеней входящих в полином мономов.

Для ненульмерного случая основной интерес представляет амортизированная эффективность. Первые запросы тратятся на расширение локальной модели: рост объема заэкшированных правил, построение локальных редукционных правил, запись значений. После завершения фазы прогрева накопленные структуры начинают использоваться повторно, что видно на графике накопительного времени исполнения (рис. 6). Уменьшение времени, затрачиваемого на полином, с ростом объема накопленных редукций, продемонстрировано на рис. 5.

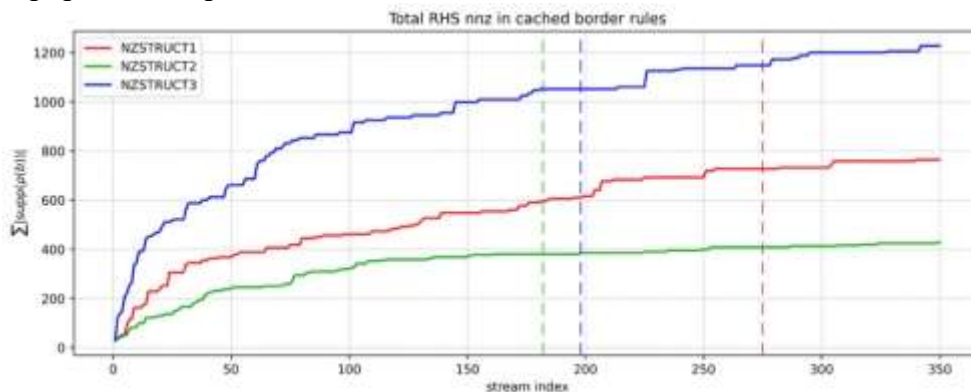


Рис. 5. Зависимости объема накопленных редукций от номера редуцируемого полинома (для трех различных алгебр)

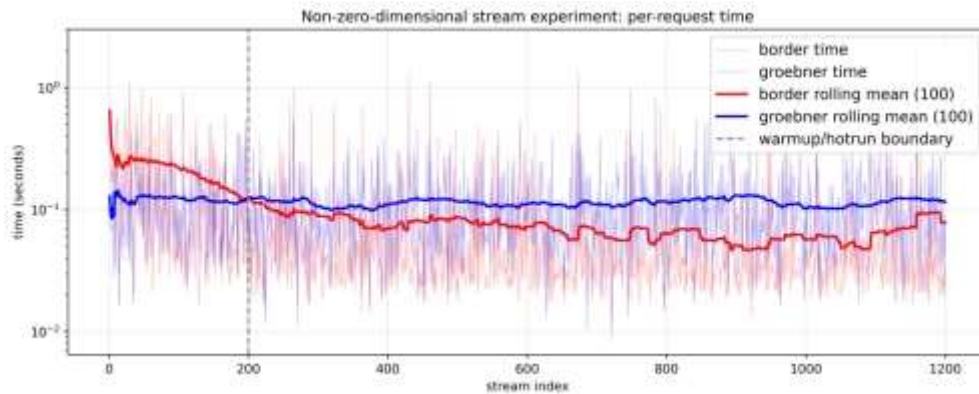


Рис. 6. Зависимости времени исполнения от номера редуцируемого полинома

Дополнительный анализ памяти показывает, что существенную роль играют размеры рабочего множества $\mathcal{O}$, его границы $\partial\mathcal{O}$, а также число и суммарный объем локальных редукционных правил.

Выводы

Проведенное исследование показывает, что бордер-базисное представление в сочетании со схемами Горнера является эффективным инструментом для вычисления нормальных форм в конечномерных факторалгебрах. На рассматриваемых классах примеров этот подход дает выигрыш как по структурной метрике, так и по реальному времени. Для ненульмерного случая адаптивное вычисление позволяет сохранить

вычислительную применимость метода и получить амортизированное ускорение при серии запросов в одной и той же алгебре.

Список литературы

1. Kreuzer M. Border Bases // Journal of Symbolic Computation. — 2007.
2. Kreuzer M., Robbiano L. Numerical Border Basis Computation // Journal of Symbolic Computation. — 2008. — Vol. 43, no. 8. — P. 591–608.
3. Mourrain B. A new criterion for normal form algorithms // Applied Algebra, Algebraic Algorithms and Error-Correcting Codes. — Springer, 1999. — P. 430–443

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К ИИ

КУРТОВА К.А.1, ВАКУЛЕНКО С.А.2

*1Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
2ИИПМаш РАН*

Аннотация. В работе предлагается новая динамическая модель, называемая моделью Лотки–Вольтерра–Хопфилда. Подобная модель объединяет конкурентную динамику многовидовых экосистем с динамикой сетей Хопфилда. Бесконечномерные системы такого рода являются универсальными динамическими системами, способными с произвольной точностью воспроизводить любую конечномерную гладкую динамику при определённых начальных условиях. Рассматриваются практические приложения: расширение ёмкости ассоциативной памяти, резервуарные вычисления и моделирование нейронных сетей прямого распространения.

Ключевые слова: универсальные динамические системы, искусственный интеллект

Постановка задачи

Понятие универсальности в математике отражает идею существования объекта, класса объектов или модели, способных моделировать или включать в себя структуры определённого типа. Примерами подобных структур могут служить, например, универсальная машина Тьюринга, способная воспроизводить поведение любой другой машины Тьюринга, и универсальный граф, представляющий собой бесконечный граф, содержащий любой конечный граф в качестве порождённого подграфа. В теории динамических систем универсальность может проявляться в способности системы симулировать другие системы с определёнными свойствами, либо в возможности вложения одной динамической системы в другие.

Предлагаемая модель представляет собой объединение двух классических систем: многовидовой системы Лотки–Вольтерра и непрерывной системы Хопфилда. Система Лотки–Вольтерра [1] описывает конкурентные взаимодействия между видами в пределах одной экосистемы, в то время как модель Хопфилда [2] представляет собой рекуррентную нейронную сеть, способную восстанавливать паттерны по их фрагментам, используя для этого аттракторную динамику.

Комбинируя динамику модели Лотки–Вольтерра и системы Хопфилда, получаем конечномерную систему вида:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left(-r_i + \varphi_i(h_i + \mathbf{K}_i x) - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} x_j \right), \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_N)$, $K_i x = \sum_{j=1}^N K_{ij} x_j$, матрица $\Gamma = (\gamma_{ij})$ удовлетворяет условию доминирования диагональных элементов, и φ_i — гладкие функции, ограниченные некоторой константой C_φ . В дальнейшем будем предполагать, что функция φ является гладкой сигмоидальной функцией, принимающей значения в интервале $\varphi \in (0, 1)$ и удовлетворяющей условиям: $\lim_{z \rightarrow +\infty} \varphi(z) = 1$, $\lim_{z \rightarrow -\infty} \varphi(z) = 0$. Систему (1) будем называть системой LVN (Lotka–Volterra–Hopfield).

Можно показать, что для системы (1) задача Коши корректно определена, т.е. решения существуют для всех $t > 0$, являются единственными, ограниченными и остаются в биологически осмысленной области.

Систему (1) можно обобщить на бесконечномерный случай. Строится банахово пространство $\mathbb{B}_\infty$, состоящее из векторов $x = (x_1, x_2, \dots)$ с конечным числом ненулевых координат и нормой супремума, и содержащее неотрицательный конус вида $\mathbb{B}_{\geq \infty} = \{x \in \mathbb{B}_\infty : x_i \geq 0, \forall i\}$.

Тогда бесконечномерная система LVN задаётся последовательностью $S = (S_i)$ и ограниченными операторами K, Γ , действующими на подпространстве $\mathbb{B}_{\geq \infty}$.

Основные результаты

В теории нейронных сетей понятие универсальной теоремы аппроксимации [3] связано со способностью нейронных сетей определённого типа аппроксимировать широкий класс функций с произвольной точностью. Данный классический принцип можно расширить на случай приближения динамики целых динамических систем. В данном контексте в качестве объекта аппроксимации выступает эволюция состояния системы во времени, и тогда рассматривается возможность динамических систем симулировать, осуществлять вложение или способность воспроизводить произвольную динамику в своём фазовом пространстве.

Будем говорить, что семейство динамических систем (возможно, бесконечномерных), зависящих от параметра $\mathbb{P}$, является универсальным динамическим аппроксиматором (УДА), если для любого $\varepsilon > 0$, любого n и любого векторного поля Q , заданного на шаре B^n единичного радиуса, это поле может быть ε -реализовано системой из данного семейства при соответствующем выборе параметра $\mathbb{P}$, то есть система содержит инвариантное многообразие, на котором её динамика приближает Q с точностью ε .

Будем строить системы со свойством УДА с фиксированными параметрами, где для реализации различных динамических режимов используется не изменение параметров, а выбор начальных данных. Будем говорить, что глобальный полупоток S^t в бесконечномерном банаховом пространстве называется универсальной динамической системой (УДС), если он способен с произвольной точностью воспроизводить любую конечномерную гладкую динамику.

Основной целью работы является доказательство того, что бесконечномерные системы LVN являются универсальными динамическими системами. Суть доказательства состоит в следующем. Сначала показывается, что любые гладкие векторные поля Q можно аппроксимировать элементами счётного набора $Q^{(m,n)}$ с точностью ε . Затем для каждого такого поля строится система Хопфилда

$$\frac{dy}{dx} = \sigma(Ky - h) - \lambda y,$$

которая его реализует, и которая далее вкладывается в LVH-систему путём подходящей замены переменных. Наконец, в бесконечномерном пространстве выбираются инвариантные подпространства всех возможных размерностей, на каждом из которых реализуется нужная динамика. В итоге, одна бесконечномерная LVH-система способна с произвольной точностью воспроизводить любую конечномерную динамику, и потому является универсальной.

Возможные практические приложения

В обычной сети Хопфилда с симметричной матрицей весов K динамика является градиентной, поэтому система стремится к минимумам энергии E , которые и являются запоминаемыми паттернами. Однако число таких минимумов ограничено и растёт линейно с размерностью системы, из-за чего при увеличении количества «воспоминаний» возможен эффект, при котором они извлекаются частично, смешиваясь с другими «воспоминаниями».

LVH-модификация увеличивает ёмкость модели. Идея состоит в том, чтобы разложить симметричную матрицу взаимодействий можно разложить как $K = AA^T$, после чего динамику можно переписать через малое число коллективных переменных $q_i = (Ax)_i$ таким образом, что она остаётся градиентной с энергетическим функционалом $E(q)$. При «выключении» подмножеств переменных $x_i = 0$, каждое подмножество индексов $I \subset [1, N]$ задаёт своё инвариантное подпространство со своей независимой динамикой, что существенно увеличивает ёмкость сети.

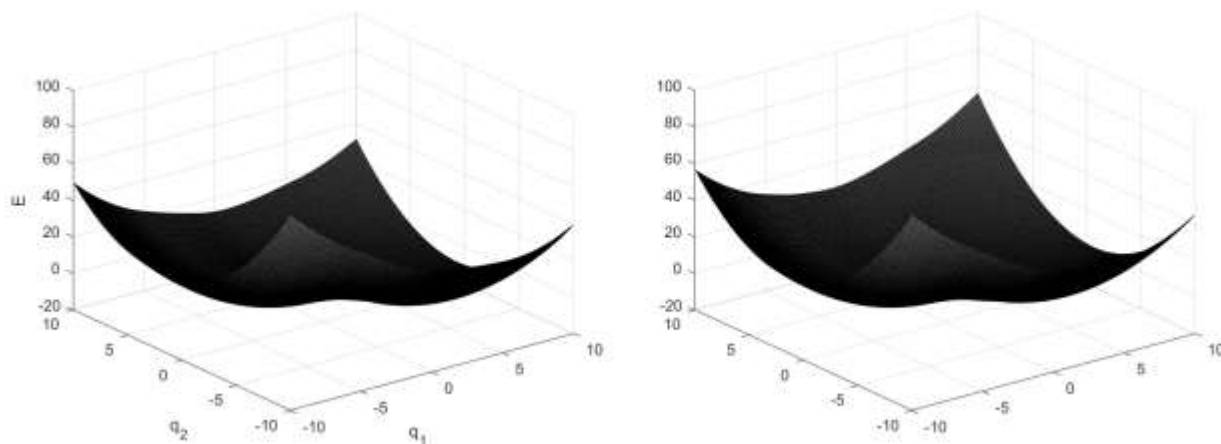


Рис. 1. (Слева) Поверхность потенциальной энергии для модели Хопфилда для двух коллективных переменных — 10 нейронов. (Справа) Поверхность потенциальной энергии для LVH-модели — 10 нейронов

Кроме того, предлагается использовать LVH-систему как основу для резервуарных вычислений (Reservoir Computing). В таком подходе некоторая сложная нелинейная динамическая система с некоторыми начальными параметрами играет роль «вычислительного слоя», и обучение сводится к настройке линейного считывания выходных данных. Идея состоит в том, чтобы вместо стандартных резервуаров, представляющих собой высокоразмерные динамические системы, использовать LVH-систему, так как она обладает богатой структурной динамикой. Одна LVH-система содержит большое число различных динамических режимов (до 2^N), и потому один и

тот же резервуар может реализовывать большое число различных вычислительных подпространств.

Ещё одним вариантом применения данной системы является моделирование с её помощью сетей прямого распространения. Однослойный перцептрон вычисляет выход как взвешенную сумму входов, пропущенную через сигмоиду. Этот вычислительный процесс можно заменить динамическим: записывается обыкновенное дифференциальное уравнение логистического типа, у которого стационарная точка, т.е. предел $x(t)$ при $t \rightarrow \infty$, сходится к выходу перцептрона. Двуслойный перцептрон устроен немного сложнее: выходом является взвешенная сумма выходов скрытых нейронов, каждый из которых вычисляет нелинейную функцию от входа. Для моделирования вводится система из нескольких уравнений: отдельные переменные $x_i(t)$ описывают динамику каждого скрытого нейрона и сходятся к его активации, а переменная $y(t)$ накапливает их взвешенную сумму и сходится к итоговому выходу сети.

Выводы

В настоящей работе показано, что бесконечномерные системы Лотки–Вольтерра–Хопфилда обладают свойством универсальной динамической системы: при подходящем выборе начальных данных одна система способна реализовывать любую конечномерную гладкую динамику с произвольной точностью. Доказательство опирается на аппроксимацию произвольных векторных полей элементами счётного семейства, их реализацию системами Хопфилда и последующее вложение в LVH-систему. Богатство динамических режимов потенциально делает системы LVH пригодными для нейросетевых вычислений.

В перспективе, возможна программная реализация резервуарных вычислений на основе предложенной модели. Предполагается, что вычислительная способность такой системы выше, чем, например, классической системы Лотки–Вольтерра [4].

Список литературы

1. Hofbauer J., Sigmund K. Evolutionary Games and Population Dynamics. — Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
2. Hopfield J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 1982. — Т. 79, № 8. — С. 2554–2558.
3. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // Mathematics of Control, Signals, and Systems. — 1989. — Т. 2, № 4. — С. 303–314.
4. Ushio M., Watanabe K., Fukuda Y., Tokudome Y., Nakajima K. Computational capability of ecological dynamics // Royal Society Open Science. — 2023. — Vol. 10, № 4.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА И НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОНА НА ПРИМЕРЕ АЛГОРИТМА GRAB CUT И АРХИТЕКТУРЫ U-NET

МАКАРОВ И.А., ЛЯЗИНА Е.А., НУРГАЯНОВА О.С.

Уфимский университет науки и технологий

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ классического численного метода (алгоритм GrabCut) и метода глубокого обучения (нейросеть архитектуры U-Net) в задаче автоматического

удаления фона. На базе разработанного программного обеспечения (C#) проведен анализ по времени выполнения, загрузке ЦП и потреблению ОЗУ на различных аппаратных платформах, а также качественная оценка результатов сегментации.

Ключевые слова: удаление фона, сегментация изображений, компьютерное зрение, выделение значимых объектов, алгоритм GrabCut, сверточные нейронные сети, U-Net, ONNX.

Введение

Задача автоматического выделения значимого объекта и последующего удаления фона является одной из базовых проблем компьютерного зрения. Ее решения широко применяются в самых разных областях.

Исторически методы решения данной задачи развивались по двум основным направлениям. Первое направление – классические численные алгоритмы, основанные на теории графов, анализе цветовых распределений и контрастности. Ярким представителем этого класса является алгоритм GrabCut.

Второе, активно развивающееся направление – методы глубокого обучения. Современный нейросетевой подход базируется на архитектурах кодер-декодер (например, U-Net), способных извлекать пространственные признаки и понимать семантический контекст сцены. Тем не менее, повсеместное внедрение методов глубокого обучения породило проблему нерационального расходования вычислительных мощностей.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа классического численного метода (GrabCut) и нейросетевой модели (U-Net) в задаче удаления фона. Для этого было разработано программное обеспечение, позволяющее провести количественный бенчмаркинг потребляемых ресурсов (времени, ОЗУ, использование ЦП) в идентичных условиях запуска, а также оценить качество визуальной сегментации на сценах различной семантической сложности.

Алгоритм GrabCut

В качестве классического численного подхода в работе используется алгоритм GrabCut, представляющий собой итеративный метод сегментации изображений, основанный на теории графов и марковских случайных полях [1].

В основе метода лежит представление изображения как графа, где узлами являются пиксели, а весами ребер – степени их визуального сходства. Задача удаления фона сводится к бинарной классификации каждого пикселя, где каждому пикселю z_n присваивается метка $\alpha_n \in \{0, 1\}$ (0 – фон, 1 – объект). Математически задача формулируется как поиск вектора меток α , минимизирующего функцию энергии Гиббса [2]:

$$E(\alpha, k, \theta, z) = U(\alpha, k, \theta, z) + V(\alpha, z),$$

где U – унарный член (терм данных), а V – бинарный член (терм гладкости).

Классический алгоритм GrabCut требует ручного вмешательства пользователя (выделения объекта прямоугольником). Для проведения объективного и автоматизированного сравнения с нейросетью в рамках разработанного программного обеспечения была предложена следующая эвристика. Алгоритм автоматически формирует начальную маску: отступ в 5% от краев изображения инициализируется как «вероятный фон», четыре угла жестко фиксируются как «точный фон», а центральная часть помечается как «вероятный передний план».

Нейросетевой метод

Альтернативный подход базируется на глубоком обучении. В работе используется архитектура U-Net, модифицированная для баланса между вычислительной эффективностью и точностью [3].

В качестве кодера применена легковесная сверточная сеть MobileNetV2 с весами, предварительно обученными на датасете ImageNet.

Обучение проводилось на специализированном наборе данных DUTS [4] с использованием фреймворка PyTorch, применялась аугментация методами библиотеки Albumentations.

Использовалась комбинированная метрика функции потерь, оптимизирующая как попиксельную точность, так и глобальную структуру объекта:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{BCE}} + L_{\text{Dice}},$$

где L_{BCE} штрафует сеть за неверную классификацию индивидуальных пикселей, а L_{Dice} максимизирует площадь пересечения предсказанной маски и эталонной.

Для интеграции модели в C#-приложение лучшие веса были экспортированы в формат вычислительного графа ONNX. Работа нейросети осуществляется через среду Microsoft.ML.OnnxRuntime.

Тестирование

Для проведения объективного количественного анализа производительности обоих подходов был разработан специализированный программный модуль. Тестирование проводилось на двух аппаратных платформах:

- Система 1: Процессор 12th Gen Intel Core i5-12500H (12 ядер, 16 вычислительных потоков).
- Система 2: Процессор AMD Ryzen 3 3200G (4 ядра, 4 вычислительных потока).

В ходе профилирования измерялись три ключевые метрики: время выполнения (мс), загрузка ЦП (%), пиковое потребление ОЗУ (МБ).

В ходе бенчмаркинга были получены усредненные значения производительности для двух алгоритмов. Результаты тестирования на двух различных аппаратных платформах сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Метрика	Алгоритм	Система 1	Система 2
Среднее время (мс)	GrabCut	485	665
	U-Net	129	354
Загрузка ЦП (%)	GrabCut	7,8%	25,8%
	U-Net	75,3%	78,2%
ОЗУ (МБ)	GrabCut	6,1	5,5
	U-Net	28,6	26,8

Анализ полученных данных позволяет выявить фундаментальные различия в архитектуре алгоритмов:

Нейросетевой подход продемонстрировал превосходство по скорости работы (быстрее в ~3,7 раза на Системе 1 и в ~1,8 раза на Системе 2). Однако этот выигрыш достигается исключительно за счет распараллеливания математических операций библиотекой ONNX. Нейросеть использует около 75–80% вычислительной мощности всего процессора.

В противовес этому, классический алгоритм GrabCut выполняется преимущественно в одном потоке. На это прямо указывает загрузка ЦП: ~25% на 4-поточном процессоре и ~7,8% на 16-поточном.

С другой стороны, численный метод является более экономичным. Для построения графа и цветовых моделей алгоритму GrabCut требуется всего около 6 МБ оперативной памяти. Нейросетевая модель использовала ~28 МБ под тензоры на каждое изображение, также модель постоянно удерживает в оперативной памяти около 140 МБ для хранения графа вычислений и весов.

Качественный анализ результатов

Для оценки точности сегментации были отобраны изображения, представляющие разные уровни семантической и визуальной сложности.

В первом случае был выбран простой геометрический объект (блокнот на деревянном столе). Визуальный анализ показал, что оба метода успешно справились с поставленной задачей.



Рис. 1. Простой геометрический объект

Во втором случае был выбран объект со сложным освещением (груша с падающей тенью).

В данной сцене объект имеет плавные цветовые градиенты, а на фоне присутствует резкая, темная падающая тень.

Численный метод продемонстрировал свои ограничения. Алгоритм включил падающую тень в итоговую маску переднего плана, а также ошибочно вырезал ножку фрукта. Это связано с тем, что пиксели тени сильно отличаются по цвету от освещенной части стола и математически ближе к темным участкам самой груши.

Нейросетевой метод сработал корректно, сверточные слои научились отличать признаки реального физического объекта от оптических эффектов на фоне.

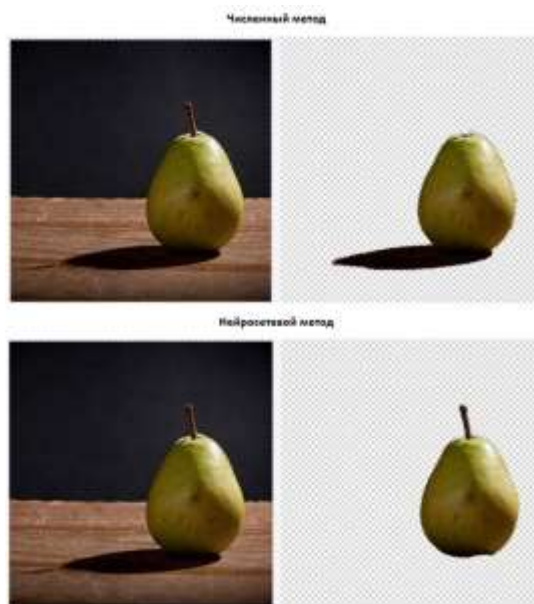


Рис. 2. Объект со сложным освещением

Заключение

Нейросетевой подход демонстрирует качество на сложных сценах и обеспечивает высокую скорость обработки за счет многопоточности. Однако за эту семантическую точность приходится платить высокой ресурсоемкостью.

Главным же недостатком нейросети является необходимость этапа обучения. Для получения работающей модели требуются тысячи размеченных вручную изображений, длительное время, специализированные графические ускорители и сложный процесс подбора гиперпараметров сети.

В то же время численный метод не требует предварительного обучения, формирования датасетов или наличия видеокарт. Как показал эксперимент с блокнотом, на контрастных объектах простой формы классический алгоритм выдает результат, визуально не уступающий нейросети. При этом GrabCut потребляет в десятки раз меньше оперативной памяти и оставляет вычислительные ресурсы процессора свободными для других фоновых задач операционной системы.

Использование тяжелых нейросетевых моделей нецелесообразно для решения базовых задач сегментации простых объектов, особенно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Внедрение алгоритмов глубокого обучения оправдано исключительно в тех случаях, когда первостепенной задачей является семантическое понимание сложных сцен с непредсказуемым освещением.

Список литературы

1. Interactive Foreground Extraction using GrabCut Algorithm // OpenCV URL: https://docs.opencv.org/3.4/d8/d83/tutorial_py_grabcut.html (дата обращения: 05.03.2026).
2. Meng Tang, Ismail Ben Ayed, Dmitrii Marin, Yuri Boykov Secrets of GrabCut and Kernel K-means // International Conference on Computer Vision (ICCV 2015). - 2015. - P. 1555-1563.
3. Коваленко А.С. Архитектура U-Net для подавления шума на изображениях с механизмами частотного и частотно-временного внимания // Журнал Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. - 2024. - №3 (346). - С. 51-62.
4. DUTS Salient Object Detection Dataset // kaggle URL: <https://www.kaggle.com/datasets/balraj98/duts-saliency-detection-dataset> (дата обращения: 10.03.2026).

ИТЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ТРАЕКТОРИИ ГРУППЫ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

ПОПОВА Д.А., ПИРОЖЕНКО В.А.

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Аннотация. В статье рассматривается итеративный метод параметризации программных траекторий группы подводных роботов, обеспечивающих развёртывание в строй «фронт». Метод основан на последовательном усложнении кинематической модели движения. Предложен алгоритм расчёта параметров траектории, который может быть использован при планировании поисковых миссий.

Ключевые слова: подводные роботы, АНПА, групповая навигация, планирование траекторий, итеративное моделирование, кинематическая модель, синхронизация движения.

Введение

Подводные роботы или автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА, рис. 1) представляют собой важный инструмент при проведении широкого спектра поисковых работ и осуществлении мониторинга состояния акваторий [1, 2]. Подобные роботы находят своё применение как в военном деле, так и в областях морской экономической деятельности. Актуальность применения подводных роботов в ВМФ связана с необходимостью выполнения ряда задач, связанных с обеспечением безопасности морских границ, проведением поисковых, разведывательных и противоминных операций.

При проведении поисковых операций группой АНПА широко применяется тактическая схема, известная как «строй фронта» или «гребёнка». В рамках этой тактики группа поисковых АНПА движется параллельными курсами в направлении на объект поиска. Расстояние между смежными аппаратами выбирается из расчёта обеспечения сплошного покрытия обследуемой области акватории поисковой аппаратурой [3].

В современных моделях АНПА количество переменных, необходимых для параметризации траектории, выросло в разы: перед участком поиска появился настраиваемый участок, представляющий собой ломаную линию. Количество звеньев в ломаной позволяет запрограммировать движение, включающее в себя отход от судна-носителя, огибание препятствий и вывод аппаратов в линию фронта. Однако алгоритм расчёта новых степеней свободы до сих пор отсутствует.

Несомненно, задача расчёта параметров траектории могла бы быть успешно решена методами машинного обучения с подкреплением. Однако такой подход имеет сложности с интерпретацией и верификацией результатов [4]. Специфика эксплуатации поисковых АНПА требует возможности аналитической верификации назначаемых параметров, обеспечения инженерной преемственности и простоты сравнения с парком старых аппаратов. Таким образом, для расчёта параметров траектории нами была построена аналитическая модель движения группы АНПА на настраиваемом участке. Для этого было выполнено

1. итеративное построение модели движения одиночного подводного аппарата,
2. исследован вопрос возможности существования траектории,
3. решена задача синхронизации движения АНПА в группе с построением во фронт.

Корректность полученных результатов на каждом этапе подтверждалась математическим моделированием. При этом управление движителями было вынесено за пределы рассмотрения как решённая подзадача.

Постановка задачи и формализация параметров

До недавнего времени АНПА имели всего несколько параметров, описывающих их траекторию: угол поворота относительно первоначального направления движения; путь, после прохождения которого аппарат запускал режим поиска, и глубину, на которой производился поиск. Угол поворота рассчитывался так, чтобы задать роботу направление на некоторую целевую точку, которая могла быть как неподвижной в земной системе координат, так и двигаться с постоянной скоростью, что характерно для задачи перехвата. При одновременном использовании нескольких роботов для вычисления параметров траектории использовались разные целевые точки. Роботы выполняли поиск, двигаясь непараллельными курсами (рис. 2 а), что уменьшало объём совокупно обследуемой области и затрудняло настройку звукоподводной связи для обмена информацией внутри группы. В новых моделях эти проблемы должны решаться за счёт настраиваемого участка траектории (рис. 2 б).



Рис. 1. Роботизированный комплекс охраны водного района «Галтель»

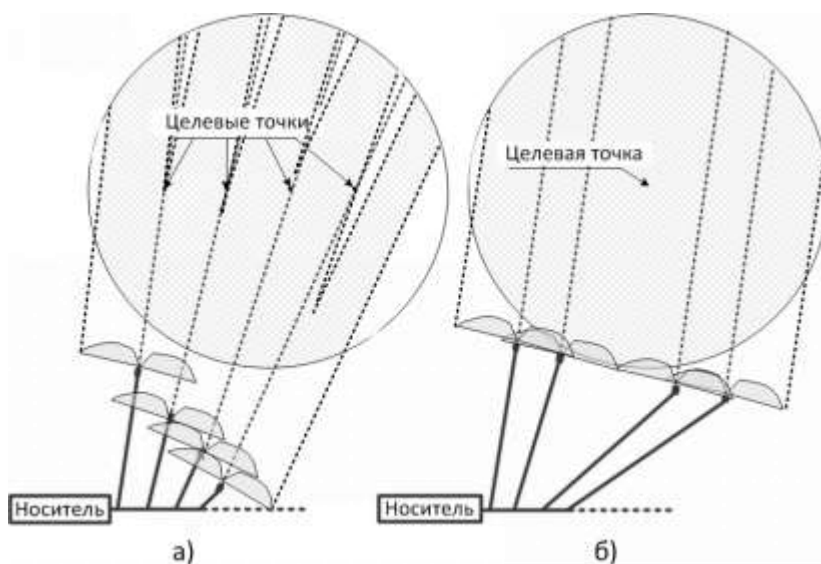


Рис. 2. Типичные траектории АНПА поисковой группы: а) для существующих моделей, б) для перспективных моделей. Штриховкой обозначена просматриваемая область

Итеративное усложнение математической модели движения одиночного АНПА

Для формализации структуры траектории одиночного подводного робота был применён подход последовательной параметрической идентификации [5]. В качестве основы была использована модель движения по существующим алгоритмам, где отсутствует настраиваемый участок траектории.

Процесс усложнения модели начался с базового случая: поворота и движения по прямой (рис. 3 а). В последующих итерациях были учтены временная задержка пуска АНПА с носителя (рис. 3 б), манёвр отведения от носителя (рис. 3 в) и движение целевой точки (рис. 3 г). На заключительной итерации были учтены смещение траектории относительно центра исследуемой области при групповом поиске (рис. 3 д), изменение глубины хода (рис. 3 е) и возможность задания аппарату скоростей для прохождения отдельных участков пути (рис. 3 ж).

В ходе итеративного усложнения модели было получено уравнение, связывающее параметры движения робота и выражающее условие его прихода в целевую точку

$$F(v, \{\alpha_i, h_i, l_i\}, \omega) = 0.$$

Здесь v – скорость движения на настраиваемом участке траектории; α_i, h_i, l_i – параметры i -го звена настраиваемого участка: α – угол поворота относительно текущего направления движения, h – изменение глубины, l – длина звена ломаной; ω – угол поворота на настраиваемом участке, задающий направление поиска.

Для определения параметров настраиваемого участка траектории уравнение F должно быть решено относительно угла ω . Остальные неизвестные не являются независимыми. Их значения могут быть определены в итерационном процессе при решении уравнения с использованием численных методов.

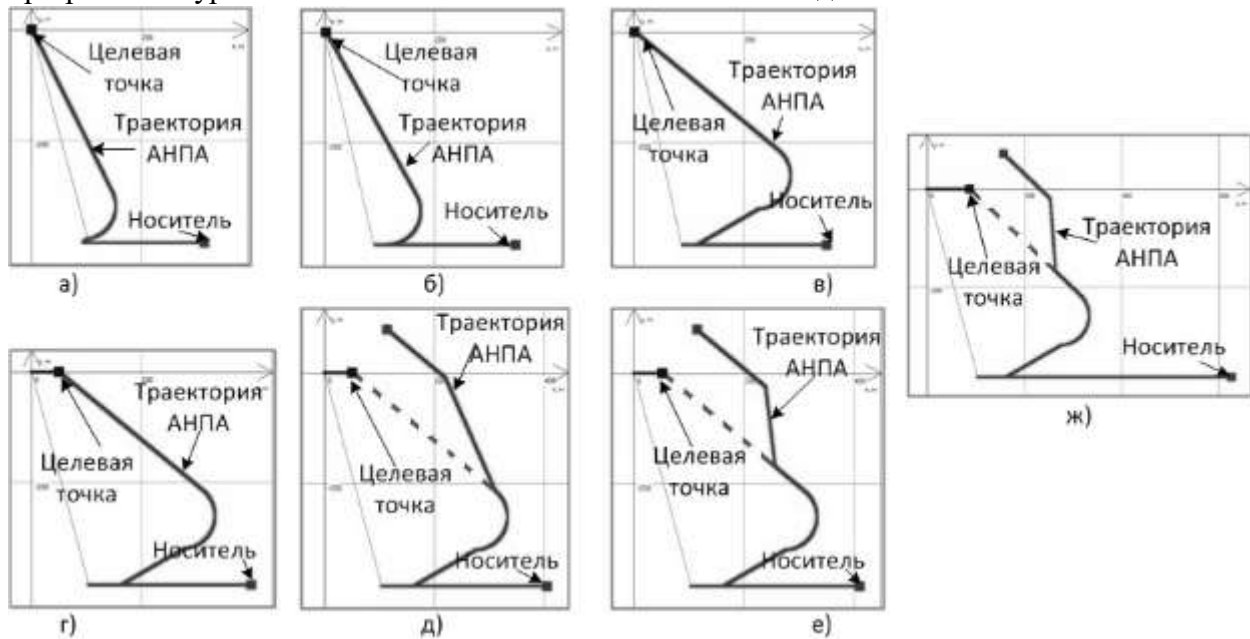


Рис. 3 – Результаты моделирования движения одиночного АНПА: а) в базовой итерации; б) с учётом задержки пуска; в) с учётом манёвра отведения; г) с учётом движения целевой точки; д) с учётом смещения относительно центра просматриваемой области; е) с учётом изменения глубины хода; ж) для движения с переменной скоростью

Синхронизация движения группы АНПА

Результатом итеративного усложнения модели стала возможность аналитического рассмотрения группового применения роботов. Процесс синхронизации движения в группе выполняется в два этапа [3]:

1. Вначале определяется робот, прибывающий в свою точку начала поиска последним в случае, если все АНПА в группе движутся со своими максимальными скоростями. Его траектория задаёт направление поиска и определяет опорное время построения фронта.
2. Оставшиеся роботы должны прибыть в свои точки начала поиска строго за опорное время. Обеспечение этого условия достигается за счёт изменения двух параметров: скорости движения и формы траектории. На этом же этапе окончательно проверяется существование решения с построением роботов во фронт. Возможные варианты траекторий движения представлены на рис. 4.

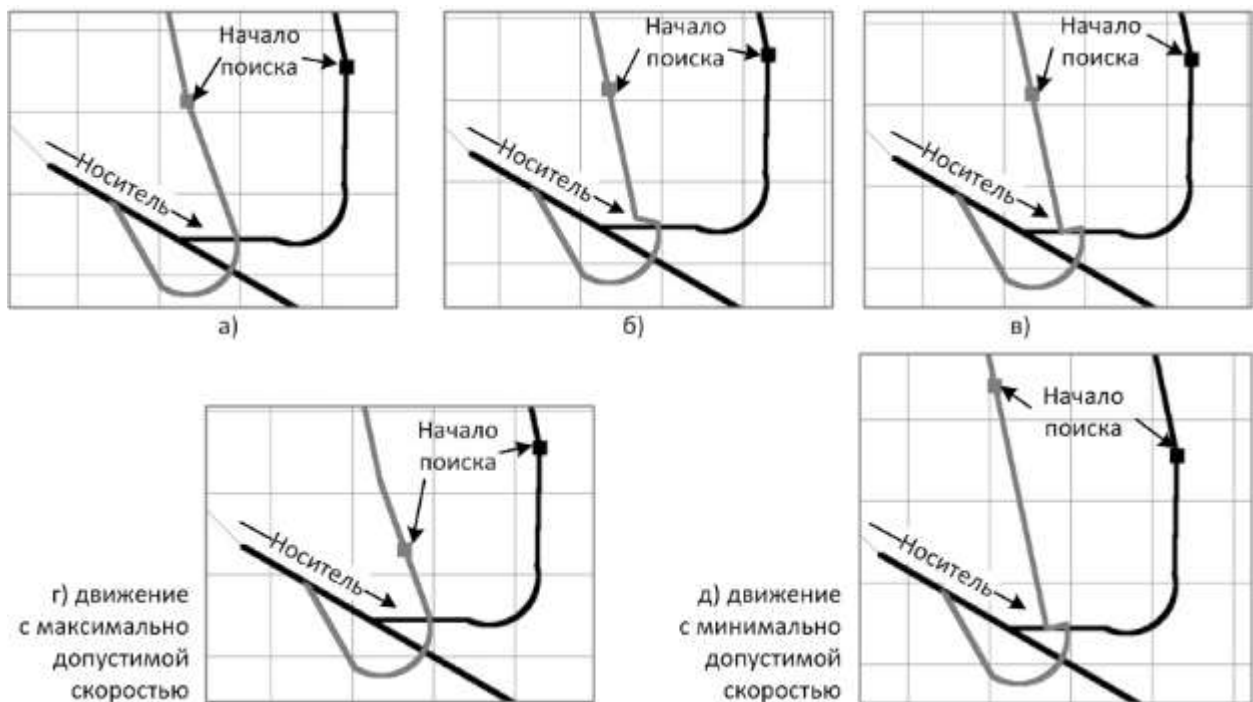


Рис. 4. Результаты моделирования разведения группы из двух АНПА к точкам начала поиска. Чёрным показан робот, задающий опорное время. Параметры движения серого робота назначаются. Случаи а), б) и в) соответствуют успешному решению задачи разведения. В случаях г) и д) построение фронта не обеспечивается

Выводы

В ходе исследования была получена математическая модель движения подводного поискового робота на настраиваемом участке траектории, а также разработан алгоритм выведения группы АНПА в геометрический строй фронта. Полученный алгоритм может быть использован для управления группой роботов в случаях, когда между ними невозможно установление связи. Впоследствии он может быть оптимизирован под решение различных задач, таких как задача осмотра заданной области акватории за минимальное время, задача построения фронта и начала поиска на минимальном расстоянии от носителя или задача оптимизации работы батареи.

Список литературы

1. K. Hasan et al., "Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing," in IEEE Access, vol. 12, pp. 46202-46231, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380458.
2. Туфанов Игорь Евгеньевич, Щербатюк Александр Федорович Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // УБС. 2012. №36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-gruppovogo-povedeniya-anpa-v-zadache-obsledovaniya-lokalnyh-neodnorodnostey-morskoy-sredy> (дата обращения: 27.04.2026).
3. J. Spiewak. Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes. Жан-Матэ Спивак. Совершенствование методов координации и управления движения группы автономных подводных аппаратов. Диссертация Жан-Матэ Спивак доктора наук университета Монпелье II (перевод) / Стулова Ольга Юрьевна. – Санкт-Петербург, 2024. – 50 с.
4. Jafarpourdavatgar H, Saeedinia SA, Mohaghegh M. Geometrical Optimal Navigation and Path Planning-Bridging Theory, Algorithms, and Applications. Sensors (Basel). 2025 Nov 11;25(22):6874. doi: 10.3390/s25226874. PMID: 41305082; PMCID: PMC12656126.
5. Wu, NL., Wang, XY., Ge, T. et al. Parametric identification and structure searching for underwater vehicle model using symbolic regression. J Mar Sci Technol 22, 51–60 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0396-8>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНОВ ИСПОЛНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ К РСУБД МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ ГИСТОГРАММ

ЧЕРЕПАНОВ Р. П.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В данной работе представлен метод статистической оценки SQL-запросов на основе двумерных гистограмм и статистического теста Cramer's V. Оценка выполняется путем применения операторов к колонкам и областям гистограммы. Разработанный метод проанализирован с точки зрения точности статистических оценок запросов.

Ключевые слова: оценка селективности, многомерные гистограммы.

Введение

SQL является одним из наиболее распространенных и универсальных языков запросов для работы с базами данных. Разработчики РСУБД исследуют и внедряют различные оптимизации для ускорения исполнения запросов. Оптимизации выполняются на физическом и логическом уровнях. Физические оптимизации подразумевают ускорение выполнения существующего плана запроса, например, с помощью индексов или выбора эффективного в конкретном случае алгоритма соединения таблиц. Логические оптимизации — это преобразования плана запроса для более эффективного исполнения, например, изменение порядка операторов.

Выбор наиболее эффективного плана запроса осуществляет оптимизатор, который должен оценить затраты на исполнение разных планов. Один из основных показателей для оценки стоимости плана — кардинальность промежуточных результатов вычисления, то есть количество кортежей в результате исполнения очередного шага. При статистической оценке операторов задача оценки кардинальности может быть сведена к оценке селективности, то есть к оценке доли кортежей, возвращаемых оператором.

Для решения задачи оценки селективности предикатов в РСУБД широко применяемым инструментом являются одномерные гистограммы. Они строятся индивидуально для каждого атрибута, разбивая его область значений на серию последовательных интервалов, для которых сохраняются граничное (слева) значение в интервале, частота попадания записей в интервал — селективность — и число уникальных значений внутри каждого интервала [1].

При использовании только одномерных гистограмм, как правило, оценки селективности на разных колонках перемножаются в предположении о независимости данных. Многомерные гистограммы являются обобщением этого метода для более точных оценок операций на зависимых атрибутах, поскольку позволяют отслеживать воздействие операторов на их совместные распределения.

Модель многомерных гистограмм

Многомерная гистограмма строится на совместном распределении пары коррелированных атрибутов. Интервалы для построения двумерной гистограммы извлекаются из одномерных гистограмм, построенных для этих атрибутов. Таким образом, в двумерном случае пространство наблюдений измельчается на прямоугольники. Каждый прямоугольник соответствует корзине гистограммы. Прямоугольнику сопоставлено граничное значение по каждой оси, и он содержит:

- Селективность — долю кортежей, принадлежащей данной корзине;
- Совместный домен — количество уникальных наборов (пар в двумерном случае) значений в данной корзине;
- Поколоночные домены — количество уникальных значений каждого атрибута в данной корзине.
- Для многомерных гистограмм можно определить следующие операции:
- Срез — построение гистограммы той же размерности, но с меньшим количеством корзин. Операция параметризуется индексами граничных корзин по каждому измерению и возвращает гистограмму, содержащую только те корзины, которые заключены между заданными границами;
- Проекция — вычисление одномерной гистограммы для заданного атрибута по многомерной гистограмме, содержащей этот атрибут. Селективность каждой корзины проекции равна сумме селективностей корзин исходной гистограммы, которые будут спроецированы в данную корзину.
- Масштабирование — перевзвешивание селективностей корзин гистограммы в соответствии с заданной гистограммой таким образом, что селективность каждой корзины проекции совпадает с аргументом.
- Пересечение гистограмм — построение новой гистограммы из двух аргументов таким образом, что набор граничных значений представляет собой объединение наборов граничных значений гистограмм-аргументов.
- С помощью вышеперечисленных операций можно описать воздействие различных операторов на отношения.

Выбор зависимых атрибутов

Для выбора пар атрибутов, на которых будут построены двумерные гистограммы, необходимо выбрать метод вычисления корреляции или иной меры ассоциации. Этот метод не должен использовать операцию вычисления разности между значениями. Это позволит применять критерий к битовым строкам и прочим нечисловым типам данных, применяемых в SQL.

Пример метода, удовлетворяющего требованию, — Cramer's V, основанный на критерии согласия Пирсона χ^2 [2].

Для каждой пары атрибутов A, B строится таблица размера $|A| \times |B|$. В каждой ячейке таблицы n_{ij} записано количество пар (A_i, B_j) . Через n_i и n_j обозначим количество наблюдений с $A = A_i$ и $B = B_j$ соответственно. Затем вычисляется статистика

$$\chi^2 = \sum_{i,j} (n_{ij} - n_i \cdot n_j / n)^2 / (n_i \cdot n_j / n).$$

Метод возвращает число из отрезка $[0, 1]$, где большие значения отражают большую ассоциацию между атрибутами:

$$V = \sqrt{\chi^2 / (n \min(k-1, r-1))},$$

где k, r — количество колонок и строк в таблице вычисления соответственно.

Пары атрибутов, для которых метод вернул достаточно большое значение V , считаются зависимыми, и для них строятся двумерные гистограммы.

Реализация операторов с помощью гистограмм

Оператор выборки представлен запросом вида «*SELECT [...] FROM t WHERE [...]*».

Операторы сравнения колонки с константой вида « $A < c$ » сводятся к операции среза. Для этого нужно вычислить последнюю в порядке возрастания границу b_i для атрибута A , которая не превышает заданного значения, и выполнить срез по индексам $A[1:b_i]$ с включением правой границы. Селективность корзин с граничным индексом точно неизвестна, но может быть оценена так:

$$0 \leq \text{sel}(i_S) \leq \text{sel}(i_H),$$

где i_S — корзина результата выборки, а i_H — корзина исходной гистограммы. Оценка снизу достигается в случае, когда константа в точности совпадает с границей или все подходящие значения уже были отфильтрованы. Оценка сверху достигается в случае, если все значения оказались меньше выбранной константы.

По аналогии выполняется оценка на оператор « $A > c$ » и на операторы нестрогого сравнения.

Оператор выборки вида « $A = c$ » также сводится к операции среза, но при этом выбирается единственный индекс b_i , корзины с которым могут содержать эту константу. Оценка на селективность этих корзин:

$$0 \leq \text{sel}(i_S) \leq \text{sel}(i_H) \cdot (d_i - 1)/d_i,$$

где d_i — поколоночный домен, соответствующий домену атрибута A . Оценка сверху выведена в предположении, что значение действительно находилось в корзине, и значения распределены равномерно. Оценка снизу — в предположении, что требуемое значение не находилось в корзине.

Оператор «AND» сводится к последовательным применениям условий-операндов.

Операторы «OR», «NOT» реализованы с помощью метода пересечения гистограмм. Для каждой корзины результата выбирается единственная соответствующая ей пара корзин гистограмм-аргументов, пересечению которых она принадлежит. Затем оценка на селективность выполняется в зависимости от применяемого оператора. Пусть H_L, H_R — гистограммы-аргументы, H_S — результат. Тогда:

$$\max(\text{sel}(i_L), \text{sel}(i_R)) \leq \text{sel}(i_S) \leq \text{sel}(i_L) + \text{sel}(i_R)$$

для оператора «OR». Оценка снизу достигается, когда одна корзина является подмножеством другой, оценка сверху — когда пересечение корзин пусто.

Для оператора «NOT»:

$$\text{sel}(i_L) \leq \text{sel}(i_S) \leq \max(\text{sel}(i_L) - \text{sel}(i_R), 0).$$

Оценка снизу достигается, когда значения в вычитаемой гистограмме не совпали с исходной гистограммой. Оценка сверху — в случае, когда удалось вычесть каждое значение. При этом селективность корзины не может упасть ниже 0.

Оператор «INNER JOIN» оценивается с использованием операций проецирования и масштабирования. Сначала гистограммы соединяемых отношений проецируются на ось A , по которой выполняется соединение. Выполняется оценка оператора с помощью алгоритмов для одномерного соединения таблиц — данные алгоритмы полагаются известными. Затем гистограммы масштабируются на результат одномерной оценки.

Оператор агрегации «GROUP BY» должен вернуть количество уникальных значений у заданного набора атрибутов. Если для этого набора атрибутов существует многомерная гистограмма, задача сводится к подсчету суммы совместных доменов во всех корзинах гистограммы. В противном случае выбираются подмножества доменов, для которых

существуют одномерные или многомерные гистограммы, и вычисляются оценки на кардинальность агрегации для этих подмножеств. Далее эти оценки перемножаются в предположении о независимости.

Таким образом, при наличии зависимых атрибутов в отношении многомерные гистограммы позволяют рассчитать результат выборки или агрегации по этим атрибутам с учетом их совместного распределения. Это позволит вывести более точные оценки селективности/кардинальности операторов и увеличить точность выбора оптимальных планов исполнения запроса.

Измерение точности

Измерение точности выполняется на наборе тестов TPC-H [3]. В качестве метрики используется кардинальность результата запроса: сравниваются оценка на одномерных гистограммах, с применением многомерных гистограмм и реальная кардинальность. При сравнении не учитываются операторы «LIMIT» или агрегации по всему отношению, если эти операторы являются последними в плане: оценки кардинальности на них тривиальны. Для 7 из 18 запросов оценка не изменилась — вероятно, в запросе не участвовали коррелирующие колонки. Для 5 запросов оценка стала более точной, для 2 запросов оценка была скорректирована в нужную сторону, для 4 запросов оценка стала менее точной. Примеры запросов для каждого случая:

Таблица 1

№	Оценка на одномерных гистограммах	Оценка на двумерных гистограммах	Фактическая кардинальность
4	607 000	910 039	5
5	58 384	34	5
9	641	1	195

Из таблицы видно, что оценка запроса №4 стала менее точной. Запрос №5 был оценен более точно. Оценка запроса №9 была занижена слишком сильно.

В целом, в 12 из 18 случаев оценка не изменилась или улучшилась, и еще в 2 случаях была скорректирована в нужную сторону. Исходя из этих результатов, модель в целом применима к задаче оценки селективности операторов, но требуется дальнейшее внесение уточнений и исправлений для уменьшения количества ошибок.

Заключение

В рамках данной работы была предложена и реализована модель многомерных гистограмм в РСУБД. Измерения на тестах TPC-H показали, что предложенный метод в большинстве случаев не изменяет или улучшает оценки кардинальности плана. Уточнение оценок операторов плана позволит оптимизатору выбирать более эффективные планы, что положительно скажется на производительности РСУБД.

Список литературы

1. Poosala V., Ioannidis Y. E., Haas P. J., Shekita E. J. Improved histograms for selectivity estimation of range predicates // ACM Sigmod Record. — 1996. — Т. 25, № 2. — С. 294–305.
2. Cramér H. Mathematical Methods of Statistics. — Princeton: Princeton University Press, 1946. — Chapter 21. The two-dimensional case. — С. 282.
3. Transaction Processing Performance Council (TPC). TPC-H Homepage [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.tpc.org/tpch/default5.asp> (дата обращения: 05.05.2026).

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ НЕРАЗРЕШИМОСТЬ ДИОФАНТОВЫХ УРАВНЕНИЙ НАД КОЛЬЦОМ ЦЕЛЫХ ЧИСЕЛ И NP-ПОЛНОТА ИХ АНАЛОГОВ НАД КОНЕЧНЫМИ ПОЛЯМИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

ШУМАРИН А. Д., НОВОСЕЛЬЦЕВА О. А., ЕРШОВА А. О.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И.
Ульянова (Ленина)*

Аннотация. В работе сравниваются диофантовы уравнения над кольцом целых чисел и полиномиальные системы над конечными полями. Рассматривается десятая проблема Гильберта отрицательное решение которой связано с работами Дэвиса, Патнэма, Робинсон и Матиясевича, а также NP-полнота квадратичных систем над конечными полями. Практическим результатом является сайт-онлайн-пособие с простыми примерами и интерактивными заданиями по теме.

Ключевые слова: десятая проблема Гильберта, диофантовы уравнения, алгоритмическая неразрешимость, конечные поля, NP-полнота, задача MQ, полиномиальные системы, онлайн-пособие.

Введение

Диофантовыми называются уравнения, в которых требуется найти целочисленные решения полиномиального уравнения с целыми коэффициентами. Простейшие примеры таких уравнений встречаются уже в школьной математике, например уравнение:

$x^2 + y^2 = z^2$, связанное с пифагоровыми тройками. Однако в общем случае вопрос о существовании целочисленных решений оказывается существенно сложнее, чем решение конкретных частных примеров. В 1900 году Давид Гильберт сформулировал список из 23 математических проблемы [1]. Десятая проблема заключалась в поиске общего метода, который по произвольному диофантову уравнению позволял бы за конечное число шагов установить, имеет ли оно решение в целых числах. В современной терминологии такой метод называется алгоритмом.

Окончательное отрицательное решение десятой проблемы Гильберта было получено в результате работ Дэвиса, Патнэма, Робинсон и Матиясевича [2, 3]. Оно означает, что универсального алгоритма для всех диофантовых уравнений над кольцом целых чисел не существует. Этот результат является одним из важнейших примеров алгоритмической неразрешимости в математике.

С другой стороны, если рассматривать похожие полиномиальные системы не над бесконечным кольцом $\mathbb{Z}$, а над конечным полем $\mathbb{F}_p$, ситуация меняется. Поскольку множество значений переменных конечно, решение всегда можно найти полным перебором. Однако при увеличении числа переменных количество вариантов растёт экспоненциально. Поэтому возникает другой тип трудности: не принципиальная неразрешимость, а высокая вычислительная сложность.

Цель данной работы — сравнить два явления: алгоритмическую неразрешимость диофантовых уравнений над целыми числами и NP-полноту квадратичных полиномиальных систем над конечными полями. Практическим результатом работы является сайт-онлайн-пособие, предназначенный для объяснения этих понятий с помощью интерактивных примеров.

Диофантовы уравнения над кольцом целых чисел

Пусть задан многочлен $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с целыми коэффициентами. Диофантова задача состоит в том, чтобы определить, существуют ли такие целые числа $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{Z}$, что $P(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0$. Для некоторых классов диофантовых уравнений существуют эффективные методы решения. Например, линейное диофантово уравнение $ax + by = c$ разрешимо в целых числах тогда и только тогда, когда $\gcd(a, b)$ делит c . В этом случае можно не только определить наличие решений, но и построить их. Однако такие методы работают только для отдельных классов уравнений. Десятая проблема Гильберта требовала алгоритм, который решал бы задачу для любого диофантова уравнения [1]. Именно это оказалось невозможным.

Ключевым результатом стала теорема Матиясевича, завершившая цепочку работ Дэвиса, Патнэма и Робинсон [2, 3]. В упрощённой форме её смысл можно описать следующим образом: достаточно сложные алгоритмические процессы могут быть закодированы в виде диофантовых уравнений. Поэтому, если бы существовал универсальный алгоритм для решения всех диофантовых уравнений, с его помощью можно было бы решить и другие известные неразрешимые задачи. Это приводит к противоречию.

Таким образом, над $\mathbb{Z}$ возникает принципиальное ограничение: для произвольного диофантова уравнения невозможно построить алгоритм, который всегда останавливается и правильно отвечает, существует ли решение.

Ограниченный перебор и его границы

На практике для диофантовых уравнений можно использовать ограниченный перебор. Например, для уравнения с k переменными можно проверять все целочисленные наборы из куба $[-N, N]^k$. Количество таких наборов равно $(2N + 1)^k$. Если решение найдено, то задача для данного уравнения решена положительно. Но если решение не найдено, это означает только отсутствие решения в выбранном ограниченном диапазоне. Из этого нельзя сделать вывод, что решения не существует во всём множестве $\mathbb{Z}^k$. Именно это различие важно для понимания десятой проблемы Гильберта. Перебор может подтвердить существование решения, если оно встретилось, но не даёт общего способа доказать отсутствие решения для произвольного уравнения.

Полиномиальные системы над конечными полями

Конечное поле $\mathbb{F}_p$ содержит конечное число элементов. Например, поле $\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$ состоит из двух элементов, а все операции выполняются по модулю 2. Рассмотрим систему полиномиальных уравнений над конечным полем:

$$\begin{cases} P_1(x_1, \dots, x_n) = 0, \\ P_2(x_1, \dots, x_n) = 0, \\ \dots \\ P_m(x_1, \dots, x_n) = 0. \end{cases}$$

В отличие от случая над целыми числами, здесь каждая переменная принимает только конечное число значений. Если поле содержит p элементов, то всего существует p^n различных наборов значений переменных. Следовательно, полный перебор всегда завершится.

Однако при росте числа переменных перебор становится практически неэффективным. Например, над полем $\mathbb{F}_2$ при n переменных нужно проверить до 2^n наборов.

Уже при сравнительно небольших n это число становится очень большим. Таким образом, над конечными полями задача является разрешимой в принципе, но может быть вычислительно трудной.

Задача MQ и NP-полнота

Особый интерес представляют квадратичные полиномиальные системы, то есть системы, в которых степень каждого многочлена не превосходит двух. Задача решения таких систем над конечными полями называется задачей MQ — Multivariate Quadratic [4].

Общая форма такой системы:

$$P_i(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, \dots, m,$$

где каждый многочлен P_i имеет степень не выше 2. Задача MQ принадлежит классу NP. Действительно, если нам предложен набор значений переменных, можно быстро проверить, удовлетворяет ли он всем уравнениям системы. Для этого достаточно подставить значения в каждый многочлен и выполнить вычисления в конечном поле.

При этом задача MQ является NP-полной [5]. Это означает, что она является одной из наиболее сложных задач в классе NP: если бы для неё был найден полиномиальный алгоритм решения, то полиномиальные алгоритмы появились бы для всех задач из NP.

Важно отметить отличие от десятой проблемы Гильберта. Над $\mathbb{Z}$ проблема неразрешима в принципе: универсального алгоритма не существует. Над конечным полем алгоритм существует — например, полный перебор, — но его время работы в общем случае растёт слишком быстро. Поэтому здесь речь идёт не о неразрешимости, а о вычислительной сложности.

Сравнение двух подходов

Сравнение диофантовых уравнений $\mathbb{Z}$ и полиномиальных систем над конечными полями удобно проводить по нескольким критериям.

1. Различается область значений переменных. В случае $\mathbb{Z}$ множество значений бесконечно. В случае $\mathbb{F}_p$ оно конечно.
2. Различается характер алгоритмической трудности. Для диофантовых уравнений над целыми числами не существует универсального алгоритма решения. Для систем над конечными полями алгоритм полного перебора существует всегда.
3. Различается практическая проблема. Над $\mathbb{Z}$ главная проблема состоит в принципиальной невозможности общего решателя. Над конечными полями главная проблема связана с экспоненциальным ростом числа вариантов.
4. Различается роль примеров. Простые диофантовы уравнения могут решаться известными методами, но это не отменяет неразрешимости общей задачи. Аналогично, небольшие системы над конечными полями можно решить перебором, но это не отменяет NP-полноты общей задачи MQ.

Это сравнение показывает, что внешне похожие математические объекты — полиномиальные уравнения — могут приводить к разным типам сложности в зависимости от области, над которой они рассматриваются.

Онлайн-пособие

Практическим результатом работы является сайт «От целых чисел к конечным полям» [6]. Он представляет собой интерактивное онлайн-пособие, предназначенное для изучения

различий между диофантовыми уравнениями над $\mathbb{Z}$ и полиномиальными системами над конечными полями.

В пособии предусмотрены следующие разделы:

1. введение в десятую проблему Гильберта;
2. примеры линейных диофантовых уравнений;
3. ограниченный перебор в целых числах;
4. вычисления над конечными полями;
5. демонстрация задачи MQ;
6. сравнение неразрешимости и NP-полноты.

Главная идея сайта состоит в том, чтобы не только дать теоретическое описание, но и показать работу алгоритмов на простых примерах. Пользователь может вводить уравнения, выбирать область вычислений, запускать перебор и видеть, как быстро растёт количество проверяемых вариантов [5].

Например, для уравнений над $\mathbb{Z}$ сайт показывает, что отсутствие решения в ограниченном диапазоне не означает отсутствия решения вообще. Для систем над $\mathbb{F}_p$ сайт показывает, что полный перебор конечен, но количество вариантов растёт как p^n . Таким образом, онлайн-пособие помогает закрепить основное различие между двумя ситуациями: над целыми числами возникает алгоритмическая неразрешимость, а над конечными полями — вычислительная трудность.

Заключение

В работе проведено сравнение двух типов задач, связанных с полиномиальными уравнениями. Диофантовы уравнения над кольцом целых чисел приводят к десятой проблеме Гильберта, отрицательное решение которой показывает невозможность универсального алгоритма. Квадратичные полиномиальные системы над конечными полями, напротив, всегда могут быть решены полным перебором, поскольку область значений конечна, однако в общем случае такая задача является NP-полной.

Главный вывод состоит в том, что конечность области не делает задачу автоматически простой. Она лишь переводит проблему из области алгоритмической неразрешимости в область вычислительной сложности.

Разработанное онлайн-пособие позволяет продемонстрировать это различие на практике. Оно может использоваться как учебный инструмент для знакомства с десятой проблемой Гильберта, конечными полями, задачей MQ и базовыми идеями теории сложности.

Список литературы

1. Гильберт Д. Математические проблемы // Bulletin of the American Mathematical Society. 1902. Vol. 8. P. 437–479.
2. Дэвис М., Патнэм Х., Робинсон Дж. Проблема разрешимости для экспоненциальных диофантовых уравнений // Annals of Mathematics. 1961. Vol. 74, № 3. P. 425–436.
3. Матиясевич Ю. В. Десятая проблема Гильберта. М.: Физматлит, 1993.
4. Гэри М. Р., Джонсон Д. С. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.
5. Куртуа Н. Т., Пепшик Й. Криптоанализ блочных шифров с помощью переопределённых систем уравнений // Advances in Cryptology — ASIACRYPT 2002. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2501. Berlin: Springer, 2002. P. 267–287.
6. От целых чисел к конечным полям [Электронный ресурс]. URL: https://olesyanovoseltseva.github.io/NNB_conference/ (дата обращения: 10.05.2026).

Сборник материалов
XIV Всероссийской Научно-практической конференции
с международным участием
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»
для студентов, аспирантов и молодых ученых
состоявшейся 16-18 мая 2026 г. в г.Санкт-Петербурге
Том II