

ННБ XIV, Санкт-Петербург, 14 – 16(17) 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 VII

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 7. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026. 160 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

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ.....	5
МОДУЛЬ АНАЛИЗА ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДИАГНОСТИКИ НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ.....	
Кроткина З.Э.	5
РАЗРАБОТКА ПЕРЕНОСИМОГО БИОСЕНСОРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА РЕСПИРАТОРНОГО СТАТУСА И ПРЕДИКЦИИ ПРИСТУПОВ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ	
Карпиков А. Н., Марков С. А., Осипов В. П.	8
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ СОКРАЩЕНИЙ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭПИЗОДОВ БРУКСИЗМА	
Сергеева Н.В.	13
СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ α - Fe_2O_3 , α - Al_2O_3 , ZrO_2 ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ	
Виноградова В.О. ^{1,2} , Бутров А.Н. ^{1,2}	16
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЗРЕНИЯ У ДЕТЕЙ МЕТОДОМ РЕФРАКЦИИ.....	
Копачев Д.А., Карлов Д.М., Ковалев М.А., Титова И.И.	20
ГЕНЕРАТОР ШУМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМЕХ В СИГНАЛЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ	
Копачев Д.А., Подоксенов А.А.	25
РАЗРАБОТКА НОСИМОЙ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА И АКТИВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ ЖЕЛЧНЫХ ПРОТОКОВ	
Пареишвили Г.З., Судаков Г.В., Антонов Р.Г.,	29
РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРОГРЕССИРОВАНИЯ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА	
Прокопчук К.Д. ¹ , Береговой Н.В. ¹ , Ситдигов Р.И. ¹	33
ВЫБОР МАТЕРИАЛА ТКАНЕИМИТИРУЮЩЕГО ФАНТОМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УВЧ-ТЕРАПИИ.....	
Пустовалов А.В., Ермолаев Д.Д., Блажнов Д.Ю., Сотников И.В. Сержантова Н.А.	37
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ПЛОТНОСТЕЙ КУЛЬТИ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ	
Рыжакова Д.В., Подоксенов А.А.	40
НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ПОЛИСАХАРИДНЫМИ ОБОЛОЧКАМИ НА УГЛЕРОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БИОСЕНСОРОВ	
Тарасенко А.Д. 1	44
РАЗРАБОТКА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО МИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ	
Фадеева В.К., Рыбаков И.А.	47
ПЕРФУЗИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СТАТИЧЕСКАЯ КОНСЕРВАЦИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	
Потанин А.Н., Крапивницкая М.А., Митягин А.М.	51
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.....	54
ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЗВУЧИВАНИЯ ПРУТКОВ ЗЕРКАЛЬНО- ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ.	
Ашихмин Д. И. ¹ , Петров Г. А. ²	54

ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО АДАПТИВНОЙ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ	
Сулиман М.	58
СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИФРОВОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА.....	
Ларичев Р.А. ¹ , Болильй А. ²	61
ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОДЛОЖЕК НИТРИДА КРЕМНИЯ Si ₃ N ₄	
Грибовская О.С. ¹	65
МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	
Лавриненко В.В. ¹ , Родиончикова А.Д., Егорова У.С. ¹ , Васильева А.В. ¹ , Парфёнов В.А. ¹	69
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА НАТУРНОЙ МОДЕЛИ С ИМИТАЦИЕЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КОЖИ	
Мецкер В.С. ¹ ,	73
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ	
Павлова С.В., Петров Г.К., Иванов П.А.	77
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ УРАВНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА.....	
Рогатых Е.А., Баронова В.А.	80
БЕСПРОВОДНАЯ КОМПАКТНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА	
Фам Ле Лонг	83
ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕНДРИТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МЕДНЫХ ПЛЁНОК	
Шматок Е. В. ¹ , Муратова Е. Н. ¹ , Мошников В. А. ¹ , Врублевский И.А. ²	87
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	90
ГРАВИТАЦИОННОЕ И МАГНИТНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМА	
Березникова Н.А. ¹ , Голубева Е.Н. ¹	90
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СППР УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ НМУ	94
Варьянов А.С.	94
ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ	
Мумджян К.А. ^{1,2} , Петрова Н.Е. ^{1,3} , Прищенко А.В. ^{1,4}	98
ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ	
Панова Д. В., Пастухова И. Р., Хващевская Я.А.	101
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРИКЛАДНЫХ ОБЛАСТЯХ	104
ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ К ДЕФЕКТАМ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ.....	
Беляков М.С.	104
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ПРИМЕРЕ ДИФFUЗНОГО ТОКСИЧЕСКОГО ЗОБА	
Дарий Е. М.	108
ПОДХОД К СТРУКТУРОВАНИЮ И СТАНДАРТИЗАЦИИ ПАЦИЕНТСКОГО АРХИВА ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OCR, LOINC И UCUM	

ИСАЕВА Е. А.,.....	110
АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОКУМЕНТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ БАЗЕ ЗНАНИЙ	
МИХАЙЛОВА М. А.....	113
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ WHISPER AI ДЛЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ.	
НОСУЛЕНКО П.А., КАРПАЧЁВ А.	117
МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗА ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ БОЛЕЗНЯМИ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ	
СКРИННИКОВ Д. А. ¹ , МАКУРИН А. Е. ¹ , КАДУЦКАЯ Д. Д. ²	119
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФУТБОЛИСТОВ ПО ДАННЫМ НОСИМЫХ БИОДАТЧИКОВ...	
ЩЕПИЛОВА В. В. ¹	123
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ	
П. В. ЧЕРНИКОВА	125
ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И АВТОНОМНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	129
СИСТЕМА ИНТЕГРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ: ЕДИНАЯ АРХИТЕКТУРА НА БАЗЕ ИИ.....	
КЛИМОВ Г. А., СПАСОВ Д.В., ГЛУЩЕНКО А.Г.	129
ML-МОДЕЛЬ МНОГОКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ПРОДУКЦИОННОЙ КСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ.....	
ДУДИН Н.О.1	136
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОПЕРАТОРА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	
ХУСНУТДИНОВ Р.Р., ЛАЗАРЕВ Э.А.....	138
ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ВТ	141
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ 3-Д КАРТЫ ПОМЕЩЕНИЯ	
ТИХОНОВ Е.В.	141
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЁТА И ХРАНЕНИЯ УЧЕБНЫХ РАБОТ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ.....	
ПАВЛОВСКИЙ Н.А., САЙДУЛИНА Е.Д.	144
АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА.....	149
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ В АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ ИГРЕ 2-Х ЛИЦ НА ГРАФЕ	
ИВАНОВ А.В., ЧУМАК В.В.....	149
ТИПОЛОГИЯ СЕТЕЙ И РАВНОВЕСИЯ В СЕТЕВОЙ ИГРЕ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ЭКСТЕРНАЛИЯМИ ЗНАНИЙ.....	
КОМАРОВ Д. А.....	153
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ.....	156
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПЛОСКИМ СПИРАЛЬНЫМ ИНДУКТОРОМ.....	
БУРСКАЯ И.В. ¹ , КОЗУЛИНА Т.П. ¹	156

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

МОДУЛЬ АНАЛИЗА ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДИАГНОСТИКИ НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

КРОТКИНА З.Э.

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

Аннотация. Растущее число пациентов с нейродегенеративными заболеваниями требует совершенствования методов ранней диагностики. Автоматизация морфометрического МРТ-анализа имеет ключевое значение для стандартизации процесса выявления структурных изменений головного мозга. Проведенный сравнительный обзор программных решений выявил разрыв между высокой точностью поверхностного анализа и скоростью воксельных методов, что легло в основу выбора комбинированного подхода, сочетающий ROI-анализ и машинное обучение, позволяющего достичь баланса между клинической применимостью и исследовательской гибкостью при умеренных вычислительных затратах. В рамках работы разработан модуль на основе 3D-Slicer для поддержки диагностики деменции Альцгеймеровского типа. Программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотек ANTs.

Ключевые слова: морфометрический анализ, МРТ, нейродегенеративные заболевания, болезнь Альцгеймера

Морфометрический анализ представляет собой метод количественной оценки структур, включающий измерение объема, толщины, размера и плотности. В нейрорадиологии сочетание магнитно-резонансной томографии и морфометрии дает возможность проведения неинвазивного исследования структур головного мозга. Данный подход позволяет оценить степень атрофии, что является биологическим маркером множества нейродегенеративных заболеваний. Одним из таких заболеваний является болезнь Альцгеймера, характеризующаяся церебральной атрофией [1].

Церебральная атрофия при болезни Альцгеймера затрагивает в первую очередь структуры медиально-височной доли: гиппокамп, а также парагиппокампальную и энторинальную кору [2, 3]. Помимо уменьшения объема серого вещества, при БА также характерно компенсаторное расширение борозд и увеличение объемов боковых желудочков, что ведет к возрастанию общего объема спинномозговой жидкости (CSF)[4].

Для реализации поставленных задач необходимо рассмотреть существующие программные решения. В результате отбора к рассмотрению выбраны следующие программы: FreeSurfer, FSL, SPM, BrainSuite, NeuroQuant. Проведенный обзор выявил разрыв между точностью и клинической применимостью. Имеющиеся аналоги предлагают либо точность, при этом уступая в скорости, либо достаточно быстрые расчеты, но все еще сложно применимые в повседневной практике клиницистами. Поэтому был выбран ROI-анализ как основной механизм оценки структур мозга и алгоритм машинного обучения как расширяющий компонент. Выбранный подход обеспечивает высокую вычислительную эффективность за счет анализа зон интереса и поддержку диагностики за счет классификации снимков на категории «Норма» и «Патология», минимизируя риск пропуска патологии.

Для реализации поставленных задач необходимо было создать набор данных для последующего обучения модели МО, а уже после разработать сам модуль. Для этого разработка была разделена на 2 основных этапа:

- Алгоритм автоматизированной обработки снимков, результатом работы которого является набор данных с морфометрическими показателями. Последовательно обрабатывает выборку из 80 снимков МРТ (40 здоровых и 40 с патологией), собирая данные в сводную таблицу.
- Интеграция алгоритма в среду 3d Slicer в виде пользовательского модуля, обеспечивающее удобное и понятное использование для клиницистов в рамках одного исследования.

Для разработки был использован набор данных международного проекта Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI). Проект направлен на изучение динамики болезни Альцгеймера.

Для решения данной задачи из общего массива данных была сформирована итоговая выборка составила 80 исследований. Для обеспечения сопоставимости морфометрических показателей исследования были отобраны в модальности MRI T1-взвешенный. Для более равномерного распределения групп пациентов были установлены следующие критерии отбора:

- Диагноз. Две глобальные группы здоровых и больных с диагнозом «Болезнь Альцгеймера» по 40 исследований в каждой
- Возраст. Выборка разделена на три возрастных диапазона от 55 до 65, от 65 до 75 и от 75 до 85. По 13-14 на группу.
- Пол. Каждая возрастная группа делилась на мужской и женский пол. По 6-7 снимков для каждой

Таким образом, сформированный набор данных представляет собой сбалансированную структуру, учитывающую ключевые демографические и клинические факторы. Использование строго отобранных T1-взвешенных снимков (см. рис. 2) позволяет минимизировать инструментальную погрешность при последующей автоматизированной обработке.

Реализованный алгоритм представляет собой цепочку подготовки данных: от необработанных снимков до получения весов модели. Он также разделен на несколько основных этапов:

- Предобработка. Подготовка снимка к последующей сегментации, приведение к общему стандарту
- Морфометрия. Автоматическое выделение структур мозга, расчет их объемов и объединение в сводную таблицу
- Обучение модели. Этап обучение классификатора на основе полученных данных, результатом которого является веса модели.

Предобработка. Для обеспечения стабильности алгоритма и оптимизации вычислительных ресурсов была разработана последовательность операций, исключая потерю значимых данных при пространственных преобразованиях. Выбранный порядок этапов обусловлен необходимостью сохранения анатомического контекста (структур черепа) для точной работы алгоритмов регистрации, при этом ресурсозатратные вычисления проводятся на предварительно подготовленной области интереса.

Морфометрия. Является основой работы всего алгоритма. На этом этапе происходит сегментация только необходимых тканей головного мозга. Этап проходит уже на предобработанных МРТ-снимках. В процессе морфометрического анализа осуществляются

сегментация областей и структур головного мозга. Для этого используются методы Atropos и DeepFLASH из библиотек ANTsPy и ANTsPyNet.

Atropos – математический алгоритм в основе работы которого лежит метод моделирования конечных смесей (Finite Mixture Modeling FMM). Выбор данного метода обусловлен точностью сегментации и сопоставимостью с результатами с признанными аналогами FAST и SPM [5].

DeepFLASH – алгоритм основан на архитектуре нейронной сети 3D U-net с пятью слоями содержащими 32, 64, 96, 128 и 256 фильтров соответственно [6].

Результатом работы обоих алгоритмов является сегментированное изображение (карта меток). Для устранения влияния фактора общего размера головы была применена пропорциональная нормализация. Вместо абсолютных значений объемов, в качестве признаков подаваемых на вход модели МО использовались относительные величины

Обучение модели МО. Проводилось исследование с целью выявления наиболее эффективной модели классификации для данной задачи. Анализ проводился на итоговой выборке из данных 80 пациентов (39 здоровых и 41 с патологией). В перечень исследуемых моделей были включены: логистическая регрессия, случайный лес (Random Forest), метод опорных векторов (SVM).

На основании сравнительного анализа для итоговой реализации в программном модуле был выбран метод опорных векторов (SVM). Выбранная модель обладает наилучшей способностью к обобщению на морфометрических признаках и обеспечивает необходимый баланс между точностью диагностики и полнотой выявления патологических изменений. Для программной реализации был использован класс SVC из библиотеки scikit-learn, поскольку решаемая задача – бинарная классификация.

Следующим этапом стала интеграция разработанного алгоритма в программную среду 3D Slicer. Данная платформа является модульным приложением для анализа и визуализации медицинских изображений, в основе работы которой лежит библиотека slicer [7]. Одним из преимуществ 3D Slicer является возможность расширения его функционала за счет создания уникальных модулей на языке Python, что позволяет создавать сложные цепочки обработки данных. В рамках данной работы был разработан модуль MorphMRI.

Для определения точности работы алгоритма проведено сравнение полученных результатов с эталонными данными. В качестве «золотого стандарта» использовались расчеты программного пакета FreeSurfer. Верификация проводилась на выборке из 60 MPT-исследований проекта ADNI, для которых были доступны результаты обработки как разработанным модулем MorphMRI, так и программным пакетом FreeSurfer.

Проведенная верификация подтвердила высокую сходимость результатов разработанного алгоритма с эталонными данными FreeSurfer, при этом наиболее высокие показатели корреляции зафиксированы для общего внутримозгового объема (0,96) и серого вещества (0,89). Значения метрики MAPE на уровне 3,27% и 4,04% соответственно свидетельствуют о высокой достоверности автоматизированных отчетов и корректности настройки параметров сегментации алгоритма Atropos. В то же время для белого вещества наблюдается отклонение MAPE в 16%, что обусловлено методическими различиями в определении границ тканей в подкорковых структурах.

Особого внимания заслуживает коэффициент корреляции для ликвора (0,60), который в сочетании с высоким показателем MAPE (191%) не является признаком ошибки, а объясняется фундаментальным различием в подходах: Atropos оценивает весь ликвор во внутримозговом пространстве, тогда как FreeSurfer ограничивается преимущественно объемами желудочков. Аналогично, при анализе гиппокампа средняя абсолютная ошибка

составила ~0,44 мл, при этом отрицательное отклонение указывает на склонность алгоритма DeepFLASH к более строгой оценке границ. Такая особенность минимизирует риск «захвата» окружающих тканей, что может быть критически важно для обнаружения ранней атрофии. Выявленные методические расхождения носят обоснованный характер и не препятствуют использованию полученных морфометрических данных для последующего использования в качестве поддержки принятия решения.

Список литературы

1. Jack C, Knopman D, Jagust W et al. Hypothetical model of dynamic biomarkers of the Alzheimer's pathological cascade *The Lancet Neurology*, 9, 119-128
2. Cortechs.ai. The benefits and limitations of neuroimaging AI software in traditional diagnostic workflow [Электронный ресурс]. – URL: (<https://www.cortechs.ai/the-benefits-and-limitations-of-neuroimaging-ai-software-in-traditional-diagnostic-workflow/>)
3. PMC. A. User-reviewed article. [Электронный ресурс]. – URL: (<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12085355/>)
4. Hainz D, Seiger R, Gaser C, et al. A multiscale approach to mapping human neuroanatomy. *Hum Brain Mapp*. 2024;45(7):e26720. doi:10.1002/hbm.26720.
5. Tustison, N.J., Yassa, M.A., Rizvi, B. et al. ANTsX neuroimaging-derived structural phenotypes of UK Biobank. *Sci Rep* 14, 8848 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59440-6>
6. Cullen, N.C., Avants, B.B. (2018). Convolutional Neural Networks for Rapid and Simultaneous Brain Extraction and Tissue Segmentation. In: Spalletta, G., Piras, F., Gili, T. (eds) *Brain Morphometry*. *Neuromethods*, vol 136. Humana Press, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7647-8_2
7. 3D Slicer Documentation [Электронный ресурс] https://slicer.readthedocs.io/en/latest/user_guide/about.html (дата обращения: 04.05.2026).

РАЗРАБОТКА ПЕРЕНОСИМОГО БИОСЕНСОРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА РЕСПИРАТОРНОГО СТАТУСА И ПРЕДИКЦИИ ПРИСТУПОВ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ

КАРПИКОВ А. Н., МАРКОВ С. А., ОСИПОВ В. П.

*Санкт-Петербургский государственный Электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. Ульянова В. И. (“Ленина”)*

Аннотация В настоящей работе представлена концепция портативного диагностического комплекса для непрерывного мониторинга пациентов с бронхиальной астмой. Устройство выполнено в формате эластичного Y-образного ремешка, интегрирующего грудной аксиометр, элементы цифровой аускультации и микроконтроллерный модуль сбора данных. Рассмотрена архитектура взаимодействия датчиков с блоком обработки на базе платформы Arduino, а также алгоритм двухуровневой сигнализации критических состояний. Особое внимание уделено дифференциации стадий приступа на основе количественных данных спирометрии и сатурации. Предлагаемое решение направлено на минимизацию человеческого фактора в условиях стрессовой ситуации, характерной для внезапного бронхоспазма. В заключение проведен анализ конкурентных преимуществ разрабатываемого изделия в сравнении с существующими на рынке средствами респираторного мониторинга. Результаты проектирования могут служить основой для создания предсерийного прототипа и последующей клинической валидации предложенного метода.

Ключевые слова: бронхиальная астма, частота дыхания, объем вдоха, трахеальный шум, частота сердечных сокращений, сатурация кислорода, пикфлоуметрия, спирометрия.

Введение

Хронические заболевания дыхательной системы, в частности бронхиальная астма, требуют не только эпизодического контроля, но и непрерывного мониторинга функционального состояния пациента в повседневных условиях. Существующие на рынке портативные пульсоксиметры,

пикфлоуметры и стетоскопы, как правило, работают изолированно, не обеспечивая комплексного сбора синхронизированных данных (дыхательные шумы, экскурсия грудной клетки, сатурация). Это снижает возможности раннего прогнозирования обострений и дифференцировки стадий приступа вне стационара. В связи с этим разработка интегрированного диагностического комплекса, сочетающего отсутствие инвазивности, непрерывность регистрации параметров и оперативную обработку сигналов, является актуальной. Практическая ценность предлагаемого решения заключается в его эргономичном формате (эластичный Y-образный ремешок, фиксируемый на теле), а также во встроенной двухуровневой системе сигнализации, основанной на объективных количественных критериях спирометрии и сатурации. Такой подход позволяет не только регистрировать факт приступа, но и дифференцировать его стадии, что повышает своевременность принятия решений пациентом или врачом.

Описание устройства

Устройство представляет собой гибридную систему, состоящую из носимой периферии и исполнительных модулей. Основой является эластичный Y-образный ремешок, обеспечивающий плотное прилегание сенсоров к телу пациента в области грудной клетки и спины при сохранении физиологичной подвижности.

Схема размещения компонентов.

Рис. 1 демонстрирует топологию размещения узлов. На грудном отведении ремешка фиксируется съемный блок аксиометра (измеритель объемных показателей дыхания) (1) и мембрана цифрового стетоскопа (4). Задняя часть ремешка содержит герметичный контейнер с блоком питания (литий-полимерный аккумулятор) (5). В центральной части, в области проекции позвоночного столба, расположен микроконтроллерный модуль (МК) с интегрированным Bluetooth-модулем (3). На фронтальной части ремешка находится датчик, который отвечает за подсчет количества вдохов владельца устройства (2)

Схемотехника

Аппаратная часть устройства базируется на следующих функциональных блоках:

Блок сбора данных:

- *Грудной аксиометр*: Датчик натяжения (тензорезистивный или емкостной), фиксирующий экскурсию грудной клетки. Позволяет вычислять показатели частоты дыхания (ЧД) и косвенно — объем вдоха (дыхательный объем, ДО).
- *Цифровой стетоскоп*: Электретный микрофон с усилителем и фильтром низких частот (ФНЧ) для регистрации трахеальных и легочных шумов. Предназначен для детекции свистящих хрипов (wheezing).
- *Пульсоксиметр*: Оптический датчик (фотоплетизмография), встроенный в грудной блок для измерения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и периферической сатурации кислорода (SpO₂).

Центр сбора (Микроконтроллерный модуль):

В качестве вычислительного ядра используется микроконтроллер семейства ATmega (платформа Arduino), осуществляющий опрос датчиков по протоколам I²C и аналоговым входам. Производится первичная фильтрация сигнала и буферизация данных.

Исполнительные узлы и коммуникация:

- *Bluetooth-модуль (HC-05/HC-06): * Обеспечивает асинхронную передачу данных на сопряженное мобильное устройство (смартфон).

- *Ингаляторный триггер*: маломощный радиоканал (или проводное соединение) для активации светового/вибро сигнала на карманном ингаляторе.

Энергонезависимый блок:

Литий-полимерный (Li-Po) аккумулятор с контроллером заряда.

Описание работы

Бронхиальная астма - хроническое неинфекционное воспалительное заболевание дыхательных путей. Главным показателем астмы является неинфекционное воспаление тканей бронхов, вызывающее гиперсекрецию защитного бронхиального секрета и бронхоспазм. Непосредственно воспаление обусловлено специфическими иммунологическими или неспецифическими механизмами. Бронхоспазм же является ключевым симптом болезни, и проявляется он повторяющимися эпизодами свистящих хрипов, одышки, приступов удушья, чувства сдавленности или стеснения в груди и удушающего кашля. В нашей работе мы будем акцентировать своё внимание на бронхоспазме и способах его отслеживания.

Функционирование системы осуществляется в двух режимах: фоновый мониторинг и критического оповещения.

В фоновом режиме микроконтроллер циклически опрашивает датчики, фиксируя закономерности респираторной механики (амплитуда движений грудной клетки). Полученные данные проходят первичную обработку для исключения артефактов движения.

При идентификации паттерна, характерного для начала бронхоспазма (изменение соотношения фаз вдох/выдох, появление высокочастотных шумов), МК генерирует управляющий сигнал на ингаляторный модуль. Данный сигнал активирует маячок (светодиодную индикацию или вибратор), указывающий пациенту на локализацию ингалятора в пространстве (например, в условиях задымления или паники).

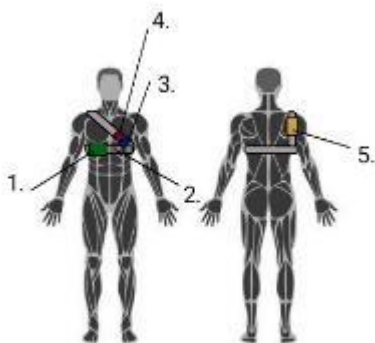


Рис. 1. Расположение устройства на теле пациента

Если сенсоры фиксируют ухудшение состояния, несмотря на предполагаемое применение ингалятора (или при отсутствии реакции на сигнал), система переходит во вторую фазу. МК через Bluetooth-канал отправляет команду-триггер на мобильное приложение. Приложение автоматически формирует SMS-сообщение или совершает вызов экстренных оперативных служб с передачей координат геолокации пациента.

Обработка результатов для выявления разных стадий приступа

Предлагаемый диагностический алгоритм базируется на комплексной оценке паттерна дыхательной недостаточности. Этот подход мультипараметрический, благодаря чему он

позволяет повысить специфичность детекции и избежать ложных срабатываний, связанных, например, с физической нагрузкой или эмоциональным возбуждением. Исходя из данных, получаемых сенсорами, мы можем точно определить наличие или отсутствие у человека астматического приступа в данный момент; таким образом были выявлены значения, представленные дальше:

- Состояние 1 (продромальный период / легкая обструкция): ЧД - 18-22, сатурация - >95%, хрипы единичные и тихие. На данной стадии бронхоконстрикция только начинает развиваться, и легочная вентиляция компенсируется организмом. Это наиболее благоприятный момент для превентивного купирования приступа с минимальными дозировками бронхолитиков. Устройство дает сигнал пациенту принять ингалятор.

- Состояние 2 (развернутый приступ / среднетяжелое течение): ЧД - 22–28, сатурация - 91–94%, хрипы слышны на выдохе, отчётливо. Снижение сатурации на 3-4% от нормы - это сигнал о нарастающей вентиляционно-перфузионной дисфункции. В данной фазе критически важно обеспечить визуальный/тактильный контроль за локацией ингалятора, так как нарастающая гипоксия может вызывать спутанность сознания и панику. Действие: сигнал принять ингалятор, если состояние не улучшается – вызвать скорую.

- Состояние 3 (тяжелое обострение): ЧД - >28, поверхностное дыхание, сатурация - <90%, хрипы - либо их нет (синдром «немного легкого»), либо они крайне громкие. Падение сатурации ниже 90% - пороговое значение, указывающее на тяжелую гипоксемию, резистентную к стандартной ингаляционной терапии. Отсутствие хрипов в сочетании с тахипноэ указывает на резкое снижение бронхиальной проходимости и истощение дыхательной мускулатуры. В этом состоянии пациент часто не способен к самостоятельному вызову помощи. Действие устройства: вызов скорой помощи.

Программное обеспечение

Логика работы встроенного программного обеспечения (прошивки МК) реализована на языке C++ в среде Arduino IDE. Алгоритм функционирует циклически с использованием прерываний от таймера.

```
void loop() {
    int thoracicExcursion = analogRead(AXIO_PIN);
    int spo2 = readSpO2(); // Чтение сатурации
    int heartRate = readHR();

    float pef_current = calculatePEF(thoracicExcursion);
    float pef_ratio = (pef_current / pef_baseline) * 100.0;

    if (pef_ratio < 50.0 && spo2 < 90) {
        state = SEVERE_ATTACK;
        triggerAmbulance();
    }
    else if (pef_ratio < 70.0 && spo2 < 93) {
        state = MODERATE_ATTACK;
        if (previous_state == MILD_ATTACK) {
            triggerAmbulance();
        } else {
            triggerInhalerBeacon(); // Сигнал на ингалятор
        }
    }
    else if (pef_ratio < 80.0) {
```

```

state = MILD_ATTACK;
triggerInhalerBeacon(); // Сигнал на ингалятор
}
else {
state = NORMAL;
}
previous_state = state;
delay(MEASUREMENT_INTERVAL);
}

```

Проблематика и актуальность

Актуальность разработки обусловлена высокой распространенностью бронхиальной астмы и, как следствие, риском внезапных летальных исходов при несвоевременно оказанной помощи. Ключевая проблема существующих методов мониторинга (пикфлоуметрия) – это дискретность измерений и зависимость от сознательности пациента. В ночное время суток или в состоянии паники пациент может утратить способность к адекватной оценке своего состояния, или просто не сможет найти ингалятор.

Разрабатываемое устройство решает задачу непрерывного мониторинга тренда респираторной функции, что обеспечивает раннее предупреждение и автоматизацию вызова помощи при тяжелых гипоксических состояниях. Это критически важно для снижения показателей смертности и улучшения качества жизни пациентов.

Конкурентоспособность

Анализ существующих на рынке и в клинической практике средств мониторинга респираторных заболеваний показал, что большинство из них функционально ограничены и не позволяют обеспечить комплексный подход к предотвращению приступов. Традиционные портативные пикфлоуметры, будучи золотым стандартом самоконтроля, обеспечивают лишь дискретные измерения и полностью зависят от когнитивных способностей и дисциплины пациента в момент ухудшения состояния. А носимые устройства массового сегмента, такие как смарт-часы, способны отслеживать сатурацию и частоту сердечных сокращений, но не предоставляют прямой информации о механике дыхания и наличии бронхоспазма. Это делает их малоинформативными для ранней диагностики астматического приступа.

Предлагаемое устройство выгодно отличается от указанных аналогов: за счет интеграции прямого измерения экскурсии грудной клетки (аксиометрия) и элементов цифровой аускультации оно позволяет регистрировать не только факт гипоксии, но и её первопричину – бронхоспазм. Ключевое конкурентное преимущество – это двухуровневая система оповещения: локальное сигнализирование на ингалятор для быстрого купирования приступа на ранней стадии и автоматическая инициация вызова экстренных служб через сопряженный смартфон при тяжелой гипоксемии. Ни одно из распространенных носимых устройств не реализует подобный алгоритм действий, что выводит систему из разряда пассивных мониторов в категорию активных ассистентов пациента. При этом конструкция в виде эластичного ремешка сохраняет высокую мобильность, недостижимую для стационарных респираторных мониторов, которые используются в условиях отделений интенсивной терапии. Дополнительным фактором конкурентоспособности является потенциально низкая себестоимость производства при масштабировании: устройство базируется на широко распространенных и доступных электронных компонентах (Arduino-

совместимые модули, стандартные датчики), в отличие от дорогостоящих специализированных медицинских микросхем.

Заключение

В ходе работы была концептуально разработана и описана структура носимого биосенсорного комплекса для пациентов с бронхиальной астмой. Предложенное схемотехническое решение на базе микроконтроллерной платформы Arduino позволяет реализовать непрерывный сбор и анализ респираторных данных. Разработанная математическая модель дифференциации стадий приступа и алгоритм работы программного обеспечения позволяют своевременно информировать пациента и автоматически вызывать экстренные службы при критическом ухудшении состояния. Устройство демонстрирует высокую конкурентоспособность за счет комбинации функций, отсутствующих в массовых серийных аналогах, и может быть рекомендовано для дальнейшей клинической апробации.

Благодарность

Особую благодарность мы выражаем Кузьмине Наталье Николаевне, старшему преподавателю кафедры физики, за помощь в организации процесса подачи заявлений на участие в конференции и за оперативную обратную связь, а также Титовой Илоне Игоревне, ассистенту кафедры биотехнических систем, за ценные советы по разработке прибора и поддержку в вопросе клинической интерпретации данных аускультации и корректной настройки порогов срабатывания алгоритма.

Список литературы:

1. Калакутский, Л. И. Аппаратура и методы клинического монитора: учеб. пособие / Л. И. Калакутский, Э. С. Манелис;
2. Чучалин, А. Г. Бронхиальная астма / Под ред. А. Г. Чучалина. — М.: Издательский дом "Атмосфера", 2008. — (Серия "Респираторная медицина").
3. Федотов, А. А. Датчики и системы респираторного мониторинга: метод. указания к практ. работе / М-во образования и науки Рос. Федерации
4. Zhukova, E. Diagnosis of bronchospasm during bronchodilator test in patients with pulmonary tuberculosis by the method of forced oscillations / E. Zhukova, L. Vokhminova // European Respiratory Journal.
5. Sulayman, A. A. Arduino microcontroller based real-time monitoring of haemodialysis process for patients with kidney disease / A. A. Sulayman
6. Огородова, Л. М. Провокационные бронхоконстрикторные тесты в современной пульмонологической практике / Л. М. Огородова, Ю. А. Петровская, Ф. И. Петровский // Российский медицинский журнал. — 2014.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ СОКРАЩЕНИЙ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭПИЗОДОВ БРУКСИЗМА

СЕРГЕЕВА Н.В.

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

Аннотация. В работе рассмотрена проблема объективной регистрации эпизодов бруксизма в домашних условиях. Предложен алгоритм обработки сигналов поверхностной электромиограммы (sEMG) жевательных мышц, основанный на вычислении среднеквадратичного отклонения (RMS) во временной области и анализе длительности активности. Алгоритм реализован на платформе Arduino Nano. Для

верификации алгоритма использовалась методика автономной проверки, не требующая использования реального электромиографического сигнала. Показано, что алгоритм надежно дифференцирует длительные эпизоды напряжения, характерные для бруксизма, от коротких сокращений, связанных с жеванием и речью. Разработан прототип носимого устройства с функцией сохранения данных на SD-карту и перспективой реализации биологической обратной связи.

Ключевые слова: бруксизм, поверхностная электромиография, RMS, MAV, Arduino, носимые устройства, обработка сигналов.

Введение.

Бруксизм — это парафункциональная активность жевательных мышц, проявляющаяся в виде скрежетания зубами или длительного стискивания челюстей, что ведёт к повреждению эмали, болям в челюсти и суставах, головной боли. Распространённость достигает 15–20% взрослого населения. Одним из эффективных методов коррекции является терапия с биологической обратной связью (БОС), однако существующие коммерческие системы дороги или требуют присутствия врача. Целью данной работы является разработка простого алгоритма обработки ЭМГ-сигнала и создание прототипа носимого устройства для регистрации длительности эпизодов мышечного напряжения, характерного для бруксизма.

Методы обработки ЭМГ и выбор признаков.

Для извлечения информации из ЭМГ-сигнала традиционно применяют три группы методов: временной, частотный и время-частотный анализ. Результат сравнительного анализа (табл. 1) показывает, что для портативного устройства с батарейным питанием методы временной области предпочтительны благодаря минимальной вычислительной сложности и достаточной точности (ошибка 2,7–3,3% против ~16,7% у простых частотных методов). В данной работе для выделения огибающей ЭМГ-сигнала и оценки его интенсивности используется комбинация двух методов временной области: среднеквадратичное отклонение (RMS) и среднее абсолютное значение (MAV).

Таблица 1

Результат сравнительного анализа

№	Метод	Формула	Ошибка	Операций	Вычисл.	Физ. смысл
1	MAV — среднее абсолютное значение	$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i $	2,69	3	O(N)	Средняя «мощность» без квадрата — быстрее RMS
2	RMS / СКО	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2}$	3,28	4	O(N)	Мощность сигнала — физически связана с силой сокращения мышцы

Первым этапом вычисляется RMS сигнала в скользящем окне для получения эффективного значения амплитуды мышечного сокращения:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2},$$

где x_i — отсчеты сигнала.

Это позволяет сгладить сигнал и подготовить его к анализу.

Далее, для принятия решения о наличии длительного напряжения, RMS-огibaющая сравнивается с калибровочным порогом. Состояние активности регистрируется, если сглаженное значение превышает порог непрерывно в течение заданного времени (MIN_ACTIVITY_DURATION), что, по сути, является реализацией принципа MAV, обеспечивающей устойчивость к коротким ложным срабатываниям:

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$$

Пороговая фильтрация по длительности, дополняющая амплитудный анализ (RMS) позволяет создать надежный и вычислительно эффективный алгоритм, пригодный для реализации на микроконтроллере.

Алгоритм детектирования. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Аналоговая предобработка (В рамках данной работы этап считается заданным).
2. Программный цифровой IIR-фильтр нижних частот.
3. Расчет RMS в скользящем окне.
4. Сравнение текущего RMS с порогом (15% от максимального произвольного сокращения, зарегистрированного при калибровке — THRESHOLD_PERCENT = 15).
5. Резервное время (RESERVE_TIME_SEC = 1,5 с): паузы короче резервного интервала не разрывают эпизод — фрагменты объединяются. Фильтрация по минимальной длительности (MIN_DURATION_SEC = 1,8 с): если суммарная длительность активности превышает уставку, событие классифицируется как эпизод бруксизма и записывается на SD-карту.

Аппаратная реализация

Прототип собран на основе микроконтроллера Arduino Nano, модуля часов реального времени DS3231 и модуля microSD-карты. В целях энергосбережения в код введен режим Idle Sleep: в моменты отсутствия активности микроконтроллер переходит в легкий сон, потребляя 5–6 мА.

Экспериментальная проверка

Для верификации алгоритма проведена автономным самотестированием: микроконтроллер генерировал сигналы через ШИМ D9 с RC-фильтром ($R = 10$ кОм, $C = 10$ мкФ, $\tau = 100$ мс) и подавал их на вход A0. Проверялись шесть сценариев. Результаты приведены в таблице 2. Все шесть тестов пройдены успешно: алгоритм устойчиво игнорирует короткие события (тесты 1–3) и корректно детектирует длительные эпизоды бруксизма (тесты 4–6), в том числе объединяя фрагменты, разделённые паузой короче резервного времени.

Таблица 2

Результаты верификации алгоритма

№	Сценарий тестирования	Ожид. результат	Получено
1	Покой 4 с	Нет эпизода	✓ Нет
2	Сжатие 0,5 с	Нет (короткий)	✓ Нет
3	Сжатие 1,0 с	Нет (короткий)	✓ Нет

4	Бруксизм 3,0 с	1 эпизод	✓ 1
5	Бруксизм + пауза 1,0 с + бруксизм	1 эпизод (объед.)	✓ 1
6	Два эпизода (пауза 3,5 с)	2 эпизода	✓ 2

Заключение

Предложенный алгоритм на основе RMS и анализа минимальной длительности эпизода позволяет надёжно выделять периоды длительного статического напряжения жевательных мышц. Реализованный на Arduino Nano прототип способен сохранять данные о зарегистрированных событиях на SD-карту для последующего анализа. Низкое энергопотребление и простота делают устройство перспективной основой для носимого трекера дневного бруксизма с функцией БОС.

Список литературы

1. Шестопапов Д.О., Маркова М.В. Исследование методов обработки электромиографического сигнала в задаче управления протезом верхней конечности. Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, № 9.
2. Зименко К.А., Боргуль А.С., Маргун А.А. Анализ и обработка сигналов электромиограммы. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2013, № 1 (83), с. 41–42.
3. Федотова Ю.М., Алиев У. Бруксизм: особенности клиники, диагностики и лечения. Волгоградский государственный медицинский университет. Волгоград, 2016.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, ZrO_2 ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

ВИНОГРАДОВА В.О.^{1,2}, БУГРОВ А.Н.^{1,2}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Проф. Попова, 5 лит. Ф, Санкт-Петербург, 197022

²Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС, В.О. Большой проспект, 31, Санкт-Петербург, 199004

Аннотация. Работа посвящена синтезу наночастиц оксида железа (III) и диоксида циркония методами мягкой химии. Гематит получали двумя способами. Путем осаждения гидроксида железа раствором аммиака из $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$ с последующей его отмывкой и гидротермальной обработкой. Во втором подходе в качестве прекурсора использовали $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, а осадителем был 1.5 М раствор щелочи, дегидратацию образовавшегося осадка проводили в гидротермальных условиях в присутствии олеиновой кислоты, как эффективного стабилизирующего агента. Наночастицы ZrO_2 также были сформированы в процессе гидротермальной обработки гидроксида циркония, предварительно осажденного из цирконил хлорида. Наноразмерный корунд в гидро- и сольвотермальных условиях получить не удалось, поэтому сначала золь-гель методом был синтезирован стеарат алюминия, который далее отжигали, подбирая условия, при которых $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ полностью перейдет в корунд с сохранением среднего диаметра частиц вплоть до 100 нм. Полученные частицы исследовали методами рентгенофазового анализа для определения/подтверждения фазы, расчета среднего размера кристаллита и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для определения формы и размера частиц.

Ключевые слова: оксидные наночастицы, гематит, корунд, диоксид циркония, гидротермальный синтез, золь-гель

Введение

В настоящее время использование оксидных наночастиц в медицине растет. Оксид железа (гематит) может применяться для адресной доставки лекарств, а также как контрастирующее вещество для лучшей визуализации опухолевых очагов на МРТ-снимках. Оксид алюминия (корунд) применяется в эндопротезировании для создания тазобедренных

протезов и стоматологии при изготовлении зубных коронок. Диоксид циркония также используется в ортопедической стоматологии и для изготовления искусственных суставов. Синтез и исследование процессов формирования оксидных наночастиц в условиях мягкой химии представляет несомненный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Материалы

В качестве прекурсоров использовались нитрат железа (CAS 7782-61-8, НеваРеактив), гидроксид аммония (CAS 1336-21-6, Вектон); железный купорос (CAS 7782-63-0, Вектон), гидроксид натрия (ГОСТ 4328-77, ЛенРеактив), этанол (CAS 64-17-5, ЛенРеактив), олеиновая кислота (CAS 112-80-1, ЛенРеактив), нитрат алюминия (CAS 7784-27-2, Sigma Aldrich), уксусная кислота (CAS 68-12-2, Вектон), стеариновая кислота (CAS 57-11-4, Уфимский химический завод), диметилформамид (CAS 68-12-2, Вектон), цирконил хлористый (CAS 13520-92-8, Вектон).

Экспериментальная часть.

Наночастицы α -Fe₂O₃ были получены 2 методами. В первом методе (А) гидроксид железа был получен осаждением из раствора соответствующего нитрата при помощи водного раствора аммиака. Полученный осадок отмывали от анионов соли методом декантации. Далее полученный гидроксид железа дегидратировали в гидротермальных условиях при 120°C в течении 13 часов. Степень заполнения ячейки составляла 80%, давление 70 МПа. Полученный порошок наночастиц сушили при 60°C. Второй метод (Б) синтеза наночастиц гематита заключался в приготовлении 2 растворов с последующим перемешиванием и гидротермальной обработкой [1]. Первый раствор получали путем смешивания NaOH, деионизированной воды и этанола с последующим добавлением олеиновой кислоты. В качестве второго раствора использовали водный раствор гептагидрата сульфата железа. Конечный раствор, полученный путем смешения 1 и 2 растворов, перемешивали в течении 6 часов. После этого готовый раствор помещали в автоклав и нагревали при температуре 160°C в течение 50 часов.

Частицы корунда получали с помощью отжига прекурсора, полученного золь-гель методом [2]. Навеску Al(NO₃)₃ наряду с 2-3 каплями уксусной кислоты добавляли в 0.5 М раствор стеариновой кислоты в диметилформамиде при 70°C и непрерывном перемешивании. Далее полученную смесь гомогенизировали в изотермическом режиме до полного растворения прекурсоров и получения прозрачного раствора. Постепенное повышение температуры выше 100°C способствовало изменению цвета расплава на ярко красный и его закипанию с выделением оксида азота (IV). После выкипания растворителя был получен бледно-желтый гель стеарата алюминия, который отжигали в течении 2 часов при температуре 700°C, 900°C, 1000°C и 1100°C.

Диоксид циркония был получен методом гидротермального синтеза. Порошок гидроксида циркония осадил из ZrOCl₂·8H₂O водным раствором аммиака, после чего отмывали до отрицательной реакции на ионы хлора, высушивали и обрабатывали в гидротермальных условиях при 240°C в течении 4 часов. После полученные частицы сушили при 80°C.

Для исследования фазового состава полученных наночастиц и расчета среднего размера кристаллитов использовался порошковый дифрактометр ДРОН-8Н (Буревестник, Россия). Для обработки полученных дифрактограмм использовали программные пакеты Crystallographica Search-Match, PDWin, Rigaku. Также форму и размер наночастиц

проверяли с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL Ltd., Япония).

Результаты и обсуждения.

На рисунке 1 представлены рентгеновские дифрактограммы наночастиц α -Fe₂O₃, полученных разными методами, которые были описаны ранее. Проведенный сравнительный анализ рефлексов с базой данных выявил соответствие образца структуре гематита α -Fe₂O₃ (000-84-0307). Средний размер кристаллитов составляет 49±4 нм и 35±4 нм (PDWin), 45±6 нм и 27±7 нм (Rigaku) для образцов, полученных 1 и 2 методами, соответственно. Значения, полученные в программных пакетах PDWin и Rigaku, примерно совпадают (значения находятся в пределах доверительного интервала). Также для образца, полученного 2 методом, наблюдается наличие фазы Fe₃O₄ (13%). Также на рисунке 1 представлены микрофотографии наночастиц, полученных с ПЭМ. Наночастицы преимущественно имеют ромбическую форму. Средний размер диагонали частиц, представленных на микрофотографиях, составляет 40 нм. Средний размер диагонали частиц, совпадает со значением средних размеров кристаллитов, полученных при обработке рентгеновских дифрактограмм. Совпадение размера частицы с размером кристаллита позволяет сделать вывод, что полученный образец является монокристаллическим.

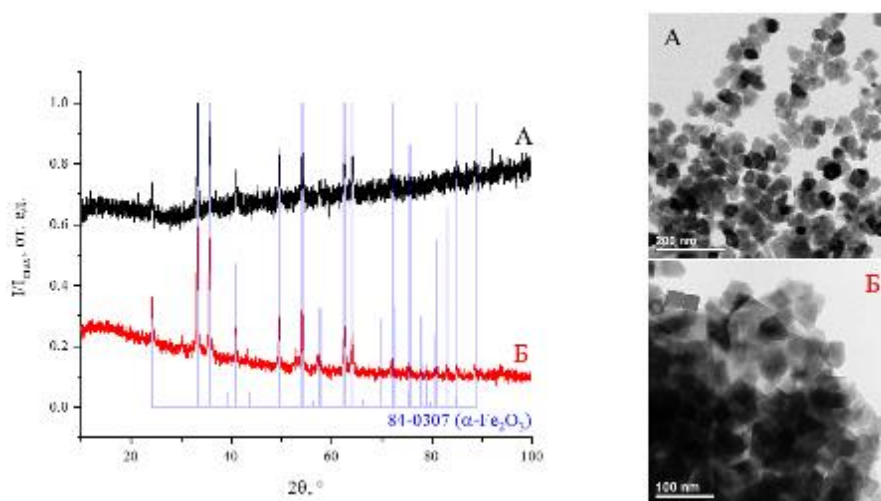


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма и ПЭМ-изображения наночастиц α -Fe₂O₃ (А – метод осаждения из нитрата железа, Б – метод осаждения из сульфата железа)

На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы порошка стеарата алюминия, отожжённого при разных температурах (700°C, 900°C, 1000°C и 1100°C). Термообработка прекурсора при 700°C не привела к образованию кристаллической структуры, на рентгеновской дифрактограмме присутствует только аморфное гало. При повышении температуры отжига до 900°C наблюдается образование кристаллитов γ -Al₂O₃ (000-75-0921) со средним размером 7±2 нм (PDWin) и 4±2 нм (Rigaku) нм. Дальнейшее повышение температуры отжига до 1000°C привело к появлению фазы корунда (000-80-0786) наряду с кристаллитами γ -Al₂O₃. Согласно оценке среднего размера областей когерентного рассеяния с использованием формулы Шеррера кристаллиты α -Al₂O₃ были существенно больше, чем у γ -Al₂O₃ и составили 38±5 нм (PDWin) и 37±3 нм (Rigaku). При 1100°C рефлексы для фазы γ -Al₂O₃ почти неразличимы, размер кристаллитов для фазы α -

Al_2O_3 увеличивается до 61 ± 6 нм (PDWin) и 52 ± 4 нм (Rigaku). Согласно СЭМ-изображению полученные частицы представляют собой крупные агрегаты микронных размеров.

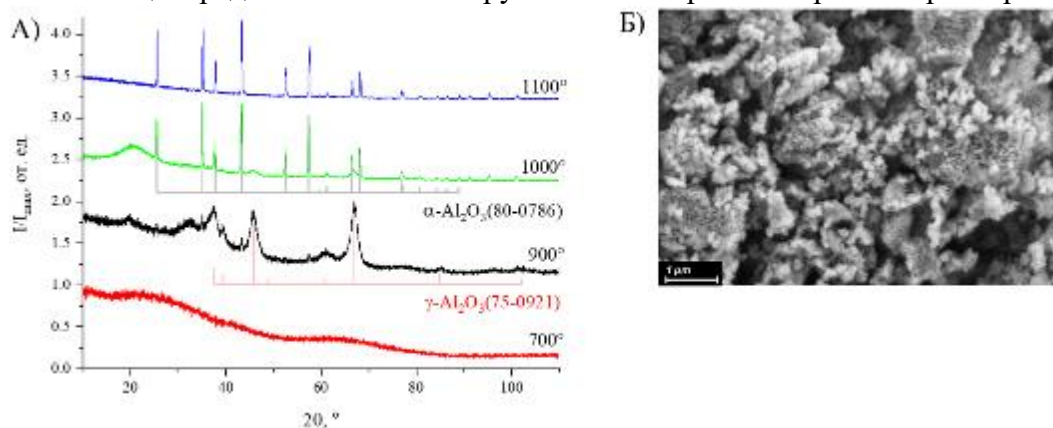


Рис. 2. А) Рентгеновская дифрактограмма наночастиц Al_2O_3 , Б) Микрофотография СЭМ наночастиц Al_2O_3 (отжиг при 1100°C)

Рентгенофазовый анализ синтезированных в гидротермальных условиях наночастиц диоксида циркония (рисунок 3) показал, что они являются смесью двух фаз, моноклинной (000-83-0938) и тетрагональной (000-79-1765), с примерно одинаковым размером кристаллитов 21 ± 3 нм (PDWin) / 18 ± 5 нм (Rigaku) и 23 ± 7 нм (PDWin) / 19 ± 4 нм (Rigaku). Соотношение моноклинной и тетрагональной фаз составляет 78% тетрагональной и 22% моноклинной (Rigaku).

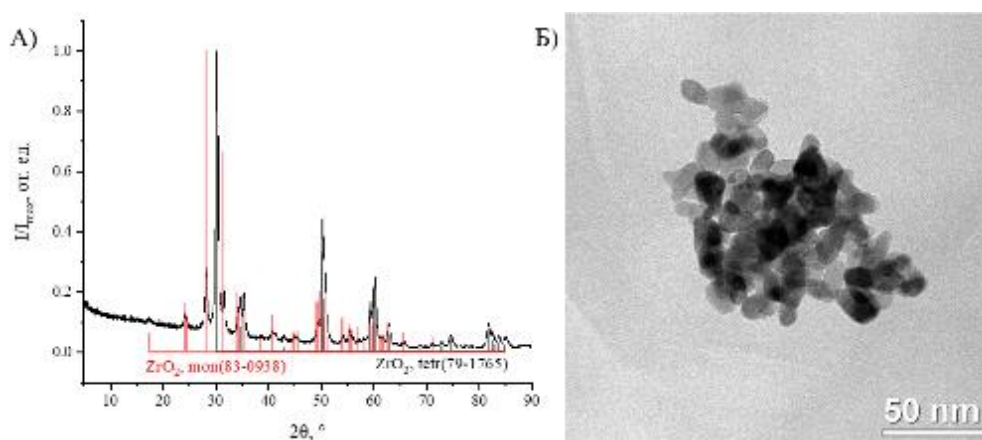


Рис. 3. А) Рентгеновская дифрактограмма наночастиц ZrO_2 , Б) ПЭМ-изображение наночастиц ZrO_2

Заключение

Наноразмерные $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и ZrO_2 были синтезированы в гидротермальных условиях, а частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ получали с использованием золь-гель технологии. Среди использованных подходов к синтезу наночастиц гематита однофазный образец был получен при гидротермальной обработке гидроксида железа, предварительно осажденного из его нитрата водным раствором аммиака. В случае гидротермальной обработки гидроксида железа, осажденного щелочью в присутствии ПАВ получались кристаллиты меньшего размера, но с примесью магнетита в количестве 13%. Согласно данным ИК-спектроскопии на поверхности данных наночастиц присутствовали ОН-группы, а ММТ-тест подтвердил отсутствие цитотоксичности данных наночастиц по отношению к фибробластам. Отжиг при 1100°C привел к образованию монофазной системы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ со средним размером

кристаллитов около 55 нм. При меньшей температуре отжига (900°C и 1000°C) наблюдалось наличие двух фаз (α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃), при этом средний размер кристаллитов уменьшался при меньшей температуре отжига. Частицы оксида циркония представляли собой смесь тетрагональной и моноклинной фаз с соотношением 78% и 22% соответственно, с примерно одинаковым средним размером кристаллитов (около 20 нм). Использование двух программных пакетов (PDWin, Rigaku) позволяет с большей уверенностью говорить о достоверности полученных результатов. Частицы α -Fe₂O₃, α -Al₂O₃, ZrO₂ являются биосовместимыми и могут применяться для адресной доставки лекарств, а также при протезировании.

Список литературы

1. Tadic M., Panjan M., Damjanovic V., Milosevic I. Magnetic properties of hematite (α -Fe₂O₃) nanoparticles prepared by hydrothermal synthesis method.
2. Bajaj N.S., Omanwar S.K.. Low-temperature stearic acid sol-gel synthesis of α -Al₂O₃ quantum dots and its optical properties.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЗРЕНИЯ У ДЕТЕЙ МЕТОДОМ РЕФРАКЦИИ

КОПАЧЕВ Д.А., КАРЛОВ Д.М., КОВАЛЕВ М.А., ТИТОВА И.И.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. В статье представлен обзор основных методов оценки клинической рефракции глаза. Рассмотрены ретиноскопия, авторефрактометрия и aberрометрия, а также фоторефракция как дистанционный альтернативный подход. Особое внимание уделено применимости методов в педиатрической практике. Проведён сравнительный анализ по критериям, значимым для массового скрининга зрения у детей. Сделан вывод о перспективности эксцентричной фоторефракции как наиболее подходящего метода для раннего выявления аметропий у детей.

Ключевые слова: рефракция глаза, ретиноскопия, авторефрактометрия, aberрометрия, фоторефракция, аметропии, амблиопия.

Введение

Нарушения рефракции представляют собой одну из наиболее распространённых проблем в мировой офтальмологической практике. По данным Всемирной организации здравоохранения, не менее 2,2 млрд человек имеют те или иные рефракционные нарушения, причём в половине случаев их можно предотвратить при своевременном выявлении [1]. Среди детей раннего возраста некорригированные аметропии (миопия, гиперметропия, астигматизм) являются ведущей причиной развития амблиопии – функционального снижения остроты зрения, не корригируемого оптическими линзами. Помимо амблиопии, несвоевременная диагностика рефракционных нарушений у детей может приводить к развитию косоглазия, астигматизма, трудностям в обучении и социальной дезадаптации [2].

Массовый скрининг рефракции у детей необходим для раннего выявления указанных состояний. Однако классические методы оценки рефракции – ретиноскопия, авторефрактометрия, aberрометрия – имеют серьёзные ограничения при использовании в педиатрии. Они требуют длительной неподвижности ребёнка, фармакологической циклоплегии для расслабления аккомодации, стационарного дорогостоящего оборудования и высокой квалификации оператора (ретиноскопия). Эти факторы делают классические

методы малоэффективны для массового скрининга в детских садах, школах и амбулаторных условиях [3, 4].

Альтернативой выступает фоторефракция – дистанционный оптический метод, позволяющий оценить рефракцию по анализу ретроосвещённого изображения зрачка. Цель настоящего обзора – сравнить существующие методы оценки рефракции (ретиноскопия, авторефрактометрия, aberрометрия, фоторефракция) по критериям, значимым для педиатрической практики: допустимая двигательная активность пациента, необходимость циклоплегии, портативность оборудования и стоимость скрининга.

Основные методы рефракции

Ретиноскопия. Ретиноскопия является одним из старейших и наиболее распространённых методов объективной оценки клинической рефракции. Физический принцип метода заключается в анализе движения светотеневой границы в области зрачка при освещении глазного дна движущимся пучком света. При эметропии и гиперметропии отражённые от сетчатки лучи выходят расходящимся пучком, при миопии, превышающей рабочую дистанцию, – сходящимся. Врач, производя качательные движения ретиноскопом, подбирает скиаскопические линзы до момента полной нейтрализации движения тени («with motion» или «against motion»). Истинная рефракция вычисляется как алгебраическая сумма силы нейтрализующей линзы и поправки на рабочее расстояние [5, 6].

Несмотря на высокую воспроизводимость, сопоставимую с авторефрактометрией ($\pm 0,25$ дптр для сферического компонента), ретиноскопия имеет ряд ограничений. Ключевым условием достоверности является расслабление аккомодации, достигаемое у детей только с помощью фармакологической циклоплегии (атропин, циклопентолат). Без циклоплегии у детей до 35–40 лет метод систематически занижает миопию и ложно регистрирует эметропию при гиперметропии – так называемая «скиаскопическая западня» [5]. Кроме того, ретиноскопия требует высокой квалификации врача и не допускает значимых движений пациента, что существенно ограничивает её применение в условиях массового скрининга у детей дошкольного возраста.

Авторефрактометрия. Авторефрактометрия представляет собой полностью автоматизированный метод измерения клинической рефракции. Большинство современных авторефрактометров основаны на принципе Шейнера, в соответствии с которым используется диск с двумя или более отверстиями. При эметропии лучи сходятся на сетчатке в одну точку, при аметропии – формируют отдельные пятна. В современных приборах применяют мультиплексные системы светодиодов и кольцевые фотоприёмники, а анализ волнового фронта осуществляется с помощью вычисления коэффициентов полиномов Цернике [7, 8].

Авторефрактометрия позволяет провести исследование за несколько секунд, минимизирует влияние человеческого фактора и обеспечивает высокую повторяемость результатов ($\pm 0,25$ дптр для сферы в 95% случаев). Однако для получения достоверных данных у детей требуется фиксация головы в подголовнике и неподвижность пациента. Техника «фоггинга» (искусственного «затуманивания» зрения с помощью $+0,75...+1,0$ дптр) не всегда позволяет полностью расслабить аккомодацию у детей младшего возраста, что приводит к миопическому артефакту. Кроме того, авторефрактометры представляют собой стационарное дорогостоящее оборудование, что делает их использование в выездных скрининговых программах затруднительным [5, 8].

Аберрометрия. Аберрометрия является высокоточным методом диагностики, позволяющим количественно оценить не только сферический и цилиндрический

компоненты рефракции, но и аберрации высшего порядка. Наиболее распространённым типом абберометров являются системы на основе датчика Шака-Гартмана. Принцип работы заключается в проецировании на глаз узкого пучка инфракрасного света (длина волны 780-850 нм), который фокусируется на сетчатке. Отражённый свет проходит через микролинзовую решётку, разбивается на множество мелких пятен, и по смещению этих пятен на CCD-матрице вычисляется профиль волнового фронта. Точность измерения дефокусировки достигает $\pm 0,05$ D [9, 10].

Несмотря на высокую точность, абберометрия имеет ограничения, делающие её малоприменимой для массового педиатрического скрининга. Метод требует полной неподвижности пациента и стабильной фиксации взгляда на внутренней мишени, что трудно достижимо у детей. Оборудование имеет высокую стоимость и не является портативным. Кроме того, для исключения динамических искажений оптической системы также рекомендуется фармакологическая циклоплегия [10]. Основной областью применения абберометрии является предоперационная диагностика при рефракционных операциях (LASIK, ReLEx Smile) и оценка качества оптической системы глаза при сложных клинических ситуациях [11].

Фоторефракция и её место в педиатрическом скрининге

Фоторефракция представляет собой семейство дистанционных оптических методов, позволяющих оценить рефракцию глаза по анализу ретроосвещённых фотографий зрачка. В отличие от классических методов, фоторефракция не требует прямого контакта с глазом, допускает определённую двигательную активность пациента и может быть реализована в портативных устройствах с низкой себестоимостью [12].

Осевая фоторефракция. Исторически первый метод фоторефракции был предложен Howland в 1962 году. Их аппарат состоял из четырёх цилиндрических линзовых сегментов, расположенных перед камерой, в результате чего изображение рефлекса глазного дна принимало форму креста в плоскости зрачка. Размеры этого креста служили индикатором рефракции глаза [13]. Последующие модификации привели к появлению ортогональной и изотропной фоторефракции, в которых камера и источник света располагались соосно с оптической осью глаза. Однако данные методы требовали получения двух изображений (до и после плоскости зрачка) либо сложной оптической конфигурации, что затрудняло их автоматизацию и массовое применение [12].

Эксцентричная фоторефракция. Значительный прогресс был достигнут с разработкой эксцентричной фоторефракции, в которой источник света располагается вне оптической оси глаза. Впервые этот метод описан Kaakinen (1979), а в дальнейшем развит Bobier, Norcia и Schaeffel с соавторами [14-17]. Принципиальное упрощение оптической схемы состояло в том, что источником света могла служить обычная фотографическая вспышка, установленная на заданном расстоянии от центра камеры.

В современном исполнении эксцентричная фоторефракция использует протяжённый источник ближнего инфракрасного света (длина волны 850 нм), расположенный эксцентрично относительно оси камеры. При освещении глаза в зрачке формируется характерный «серп» – область повышенной яркости, форма и распределение которой зависят от рефракции глаза. При гиперметропии градиент яркости возрастает от нижнего края зрачка к верхнему, при миопии – обратная картина. Анализ градиента яркости с помощью линейной регрессии позволяет оценить рефракцию глаза с точностью, достаточной для скрининговых целей [18, 19].

Важнейшим преимуществом эксцентричной фоторефракции перед классическими методами является возможность проведения исследования без циклоплегии. Метод естественным образом работает в условиях гиперметропического размытия, что позволяет расслабить аккомодацию без медикаментов. Кроме того, фоторефракция допускает определённую подвижность пациента (до 1 см), не требует контакта с глазом, а время исследования составляет доли секунды [20, 21]. Именно эти особенности делают эксцентричную фоторефракцию наиболее подходящим методом для массового скрининга рефракции у детей в возрасте до 5-6 лет, а также у пациентов с особенностями развития, неспособных к длительной фиксации взгляда [22].

Сравнительный анализ методов

Для наглядного сопоставления рассмотренных методов по критериям, значимым для педиатрической практики, была составлена краткая сводка. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов оценки рефракции применительно к педиатрии

Критерий	Ретиноскопия	Авторефрактометрия	Абберометрия	Эксцентричная фоторефракция
Рабочее расстояние, мм	50-100	12-15	12-15	50-100
Необходимость циклоплегии	Обязательна	Рекомендована	Рекомендована	Не требуется
Допустимая двигательная активность	Низкая	Низкая	Очень низкая	Высокая
Автоматичность метода	Нет	Да	Да	Да
Портативность оборудования	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая
Относительная стоимость	Низкая	Высокая	Очень высокая	Низкая
Возможность одновременной бинокулярной оценки	Нет	Нет	Нет	Да
Квалификация оператора	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая

Представленные данные свидетельствуют, что эксцентричная фоторефракция выигрывает по совокупности ключевых параметров: дистанционность исследования, отсутствие необходимости в циклоплегии, высокая допустимая двигательная активность пациента, портативность и низкая стоимость оборудования. Ретиноскопия, несмотря на высокую точность и возможность использования при нистагме и косоглазии, требует обязательного медикаментозного расслабления аккомодации у детей и высокой квалификации врача [5, 6]. Авторефрактометрия и абберометрия, будучи автоматизированными и точными, остаются стационарными и дорогостоящими, что ограничивает их применение в массовом скрининге вне клинических учреждений [8, 10].

Заключение

Проведённый анализ демонстрирует, что ни один из традиционных методов оценки рефракции (ретиноскопия, авторефрактометрия, aberрометрия) в отдельности не удовлетворяет полной совокупности требований к педиатрическому массовому скринингу: дистанционность, отсутствие необходимости в фармакологической циклоплегии, низкая стоимость, портативность и устойчивость к умеренной двигательной активности пациента.

Фоторефракция, в особенности её эксцентричный вариант с анализом градиента яркости зрачка, принципиально решает указанные ограничения. Возможность исследования с расстояния 0,5-1,0 м, отсутствие необходимости в контакте с глазом и медикаментозном расслаблении аккомодации, высокая скорость получения результата и низкая себестоимость аппаратной реализации делают эксцентричную фоторефракцию оптимальным методом для раннего выявления аметропий (миопии, гиперметропии, астигматизма) у детей дошкольного и младшего школьного возраста. Применение инфракрасного излучения (850 нм) обеспечивает максимально комфортные условия для ребёнка, не вызывая миоза и дискомфорта, а одновременная съёмка двух глаз в одном кадрекратно повышает эффективность скрининга.

Классические методы (ретиноскопия, авторефрактометрия, aberрометрия) сохраняют свою ценность на этапах углубленного клинического обследования, подтверждения сложных случаев (иррегулярный астигматизм, кератоконус, патологии хрусталика) и предоперационной диагностики. Таким образом, наиболее рациональной стратегией массового скрининга рефракции у детей представляется двухэтапная система: первичный скрининг с использованием портативного устройства на основе эксцентричной фоторефракции с последующим направлением детей с выявленными отклонениями к офтальмологу для уточняющей диагностики классическими методами.

Список литературы

1. World Health Organization. World report on vision. Geneva: WHO; 2019. 160 p.
2. Silverstein E., Donahue S.P. Preschool Vision Screening: Where We Have Been and Where We Are Going. *Am. J. Ophthalmol.* 2018;194:xviii–xxiii.
3. Ferreira A., Vieira R., Maia S. et al. Photoscreening for amblyopia risk factors assessment in young children: A systematic review with meta-analysis. *Eur. J. Ophthalmol.* 2023;33(1):92–103.
4. Horwood A.M., Griffiths H.J., Carlton J. et al. Scope and costs of autorefraction and photoscreening for childhood amblyopia – a systematic narrative review in relation to the EUSCREEN project data. *Eye.* 2021;35:739–752.
5. Gurnani B., Kaur K. Autorefractors. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023.
6. Калиниченко А.Н. Цифровая обработка сигналов в медицинских приборах и системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2022. 100 с.
7. Bellucci C., Mora P., Tedesco S.A., Gandolfi S., Bellucci R. Automated and subjective refraction with monofocal, multifocal, and EDOF intraocular lenses: review. *J. Cataract Refract. Surg.* 2023;49(6):642–648.
8. Beverage J.L., Schwiegerling J. A Shack-Hartmann-based autorefractor. *J. Refract. Surg.* 2006;22(9):932–937.
9. Burns S.A. The spatially resolved refractometer. *J. Refract. Surg.* 2000;16(5):S566–S569.
10. Thibos L.N., Hong X., Bradley A., Applegate R.A. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2002;19(12):2329–2348.
11. Campbell M.C., Bobier W.R., Roorda A. Effect of monochromatic aberrations on photorefractive patterns. *J. Opt. Soc. Am. A.* 1995;12(8):1637–1646.
12. Howland H.C. Photorefraction of eyes: History and future prospects. *Optom. Vis. Sci.* 2009;86(6):603–606.
13. Howland H.C., Braddick O., Atkinson J. Optics of photorefraction: Orthogonal and isotropic methods. *J. Opt. Soc. Am.* 1983;73:1701–1708.
14. Kaakinen K. A simple method for screening of children with strabismus, anisometropia or ametropia by simultaneous photography of the corneal and the fundus reflexes. *Acta Ophthalmol.* 1979;57:161–171.
15. Bobier W.R., Braddick O.J. Eccentric photorefraction: Optical analysis and empirical measures. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1985;62:614–620.

16. Norcia A.M., Zadnik K., Day S.H. Photorefractive error with a catadioptric lens. Improvement on the method of Kaakinen. *Acta Ophthalmol.* 1986;64:379–385.
17. Schaeffel F., Wilhelm H., Zrenner E. Inter-individual variability in the dynamics of natural accommodation in humans: Relation to age and refractive errors. *J. Physiol.* 1993;461:301–320.
18. Schaeffel F., Farkas L., Howland H.C. Infrared photoretinoscope. *Appl. Opt.* 1987;26:1505–1509.
19. Bharadwaj S.R., Sravani N.G., Little J.A. et al. Empirical variability in the calibration of slope-based eccentric photorefractive error. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2013;30:923–931.
20. Wu Y., Thibos L.N., Candy T.R. Two-dimensional simulation of eccentric photorefractive error images for ametropes: Factors influencing the measurement. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 2018;38:432–446.
21. Sravani N.G., Nilagiri V.K., Bharadwaj S.R. Photorefractive error estimates of refractive power varies with the ethnic origin of human eyes. *Sci. Rep.* 2015;5:7976.
22. Patel A.M., Kumar P., Vaddavalli P.K. et al. The Value of Eccentric Infrared Photorefractive Error in Evaluating Keratoconus. *Optom. Vis. Sci.* 2022;99:763–773.

ГЕНЕРАТОР ШУМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМЕХ В СИГНАЛЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ

КОПАЧЕВ Д.А., ПОДОКСЕНОВ А.А.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Образовательный процесс в области обработки биомедицинских сигналов требует наличия специализированных учебных стендов, позволяющих генерировать электрокардиограмму (ЭКГ) с программируемыми параметрами и различными видами помех. В данной работе предложена структурная схема устройства, реализующая аддитивное наложение артефактов на синтезированный сигнал ЭКГ. Приведены типовые параметры помех для последующего моделирования. Разработанное решение предназначено для освоения студентами методов фильтрации в контролируемых условиях.

Ключевые слова: учебный стенд, генератор шумов, электрокардиограмма, ЭКГ, помехи, фильтрация сигналов, моделирование.

Введение

Освоение методов фильтрации и подавления артефактов является важной частью подготовки инженеров в области биомедицинских систем. Для формирования соответствующих практических навыков необходимо наличие специализированных устройств, позволяющих моделировать физиологические сигналы с помехами в контролируемых условиях. Однако в учебном процессе такие средства часто отсутствуют, что затрудняет подготовку специалистов.

В связи с этим был разработан учебный стенд для моделирования помех в сигнале электрокардиограммы (ЭКГ). В настоящей работе рассматриваются структурная схема генератора, классификация основных типов помех, а также методы синтеза ЭКГ-сигнала, используемые в разработанном устройстве.

Классификация и параметризация помех ЭКГ-сигнала

Для эффективного моделирования помех необходима их систематизация и точное описание параметров. В данном разделе представлены основные классы артефактов ЭКГ-сигнала, которые воспроизводятся в разработанном учебном стенде.

Артефакты движения. Данный тип помех возникает вследствие изменения сопротивления в цепи электрод-кожа при движении электрода, а также в результате мышечной активности [2]. В эту категорию входят:

Артефакты мышечных сокращений — шумы, амплитуда которых составляет 90–110% от амплитуды ЭКГ, длительность — 50 мс [2], частотный диапазон — от 0,01 до 104 Гц [1].

Мышечные сокращения могут быть обусловлены случайными движениями, патологическим состоянием пациента (тремор) и внешними факторами (например, температурой помещения). Одним из вариантов подавления артефактов мышечных сокращений является полосовой фильтр. Частоты среза при полосовой фильтрации выбираются в соответствии со спектром ЭКГ.

Артефакты смещения электродов — кратковременные отклонения изолинии длительностью от 100 до 500 мс, амплитуда которых может достигать 500% от амплитуды ЭКГ [2]. Возникают в результате изменения сопротивления электрод-кожа, связанного с движением электрода или высыханием геля.

Контактный шум электродов — это преходящая помеха, вызываемая потерей контакта между электродом и кожей. Она может возникать в случаях, когда слабо закрепленный электрод отсоединяется от кожи в результате движений пациента. Имеет вид случайным образом возникающего быстрого смещения (скачка) изолинии, экспоненциально спадающего до начального уровня [2].

Сетевая наводка. Данная помеха имеет вид синусоидального сигнала частотой 50 Гц и его гармоник. Амплитуда сетевой наводки может достигать 50% от амплитуды ЭКГ [2]. Причиной возникновения является воздействие электромагнитного поля, создаваемого сетями переменного тока промышленной частоты [5].

Дрейф изолинии. Представляет собой низкочастотную аддитивную помеху синусоидальной формы с частотой 0,15–0,3 Гц. Амплитуда дрейфа достигает 15% от амплитуды ЭКГ [2, 4]. Основной причиной возникновения данного артефакта является дыхание пациента [3].

Линейная фильтрация помехи малоэффективна. После этапа фильтрации в составе ЭКС сохраняется часть сигнала дрейфа изоэлектрической линии, так как его спектр находится в полосе частот полезного сигнала. В данном случае, окончательное устранение дрейфа изолинии из сигнала ЭКС — достаточно сложная задача, так как линейная фильтрация неизбежно приведет к ослаблению и искажению полезного сигнала.

Нелинейная фильтрация состоит в том, что сначала формируется компенсационный сигнал, а затем вычитается из входного сигнала. Участок ТР ЭКС соответствует электрической диастоле сердца, т. е. в этот период сердце не совершает механических сокращений, и на поверхности тела, где установлены электроды, разность потенциалов отсутствует. Поэтому если на ЭКС действует аддитивная низкочастотная помеха, проявляющаяся в виде дрейфа изолинии, то на данном участке присутствует только сигнал этой помехи при условии, что все остальные помехи отсутствуют. Это позволяет компенсировать сигнал дрейфа путем интерполяции на остальные участки ЭКС. В процедурах формирования компенсирующего сигнала остальные участки ЭКС исключаются [9]. Наиболее перспективными методами интерполяции сигнала дрейфа изолинии является использование сплайн-функций [10, 11].

Выбор помех. Для реализации учебного стенда были выбраны три клинически значимых типа помех: артефакты движения (миографические шумы), дрейф изолинии и сетевая наводка промышленной частоты. Данный набор обеспечивает охват ключевых частотных диапазонов — низкочастотного (0,1–1 Гц), широкополосного (до 104 Гц) и узкополосного (50 Гц), что позволяет продемонстрировать применение спектрально разнородных методов фильтрации. Исключен контактный шум электродов, так как его природа является аппаратной и не подлежит коррекции методами обработки сигнала. Выбранные помехи обладают высокой воспроизводимостью и обеспечивают комплексную демонстрацию типовых задач очистки ЭКГ в учебных целях.

Методы синтеза ЭКГ-сигнала

Помимо моделирования помех, ключевой задачей является синтез ЭКГ-сигнала, выступающего основой для последующего наложения артефактов. В разработанном учебном стенде для генерации сигнала ЭКГ применяются два подхода: аддитивная модель и метод периодического воспроизведения предварительно записанных кардиоциклов. Использование двух различных методов позволяет расширить возможности стенда и обеспечить как полностью контролируемый синтез сигнала, так и работу с реалистичными формами кардиоциклов.

Аддитивная модель ЭКГ – это метод синтеза искусственного электрокардиографического сигнала путем сложения математически смоделированных P, Q, R, S, T зубцов. Причем пики Q, R и S объединены в QRS-комплекс, так как между ними нет изолиний. Каждый компонент описывается отдельной гауссовой функцией [6, 7, 8]. Формула полного сигнала ЭКГ может быть описана следующей моделью (1):

$$ECG(t) = P(t) + QRS(t) + T(t), \quad (1)$$

где $P(t)$ – функция волны деполяризации предсердий;

$QRS(t)$ – функция комплекса деполяризации желудочков;

$T(t)$ – функция волны реполяризации желудочков;

Метод воспроизведения кардиоциклов реализован путем последовательного повторения массива отсчетов, подаваемого на ЦАП. Исходные данные из открытых баз содержали шумы, поэтому была применена полосовая фильтрация. Для дальнейшей работы выбран сигнал, представленный на рисунке 1, как наиболее соответствующий теоретической модели.

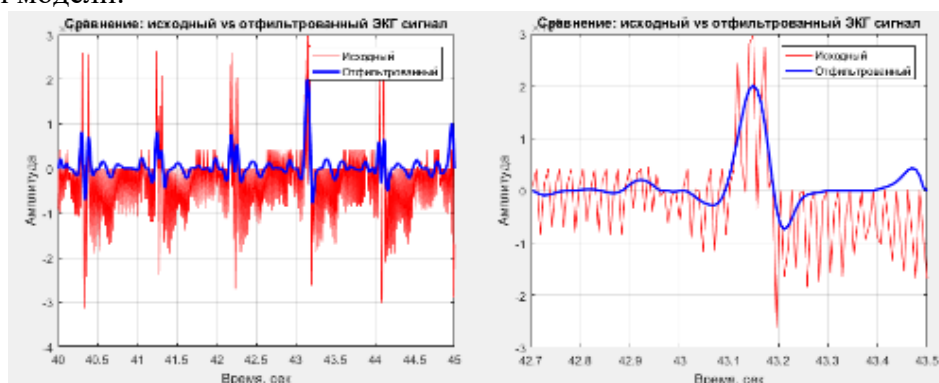


Рисунок 1. Отрезок записи (слева) и выбранный цикл (справа) ЭКГ сигнала.

Структура учебного стенда

Для реализации генератора ЭКГ с помехами разработана структурная схема учебного стенда, представленная на рисунке 2. Устройство обеспечивает синтез чистого сигнала, моделирование помех и их наложение для последующего анализа.

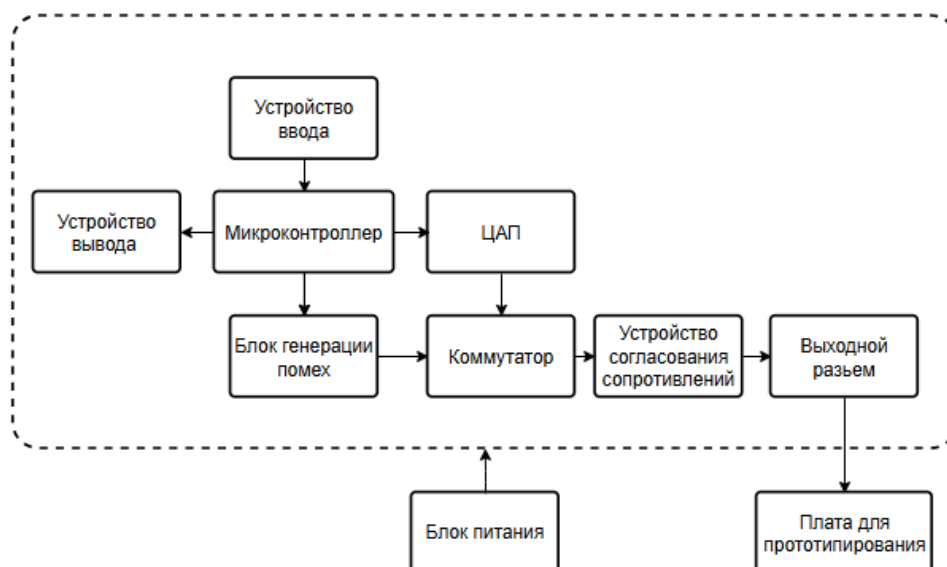


Рисунок 2. Структурная схема учебного стенда

Учебный стенд функционирует под управлением микроконтроллера, отвечающего за синтез ЭКГ-сигнала и программируемых помех. Цифро-аналоговое преобразование формирует аналоговый сигнал ЭКГ, который суммируется с помехами в коммутаторе. Комбинированный сигнал через согласующее устройство передается на плату прототипирования для исследования фильтрующих цепей. Параметры сигналов задаются пользователем посредством энкодера и отображаются на дисплее. Электропитание системы осуществляется от стабилизированного блока питания.

Промежуточные результаты

Для проверки методов генерации ЭКГ-сигнала была разработана аппаратная реализация на базе микроконтроллера ATmega328P, обеспечивающая циклическое воспроизведение предварительно сгенерированных массивов отсчетов ЭКГ. На рисунке 3 представлены сгенерированные аддитивная модель ЭКГ и модель, полученная методом воспроизведения реального кардиоцикла соответственно:



Рисунок 3. Результат генерации аддитивной модели ЭКГ (а) и модели, полученной методом воспроизведения реального кардиоцикла (б).

Заключение

В данной работе проведен анализ основных типов помех электрокардиографического сигнала, рассмотрены методы синтеза ЭКГ (аддитивная модель и воспроизведение

кардиоциклов) и разработана структурная схема учебного генератора шумов. Устройство позволяет моделировать различные артефакты и накладывать их на синтезированный сигнал ЭКГ, что дает возможность изучать методы фильтрации в контролируемых условиях учебного процесса.

Список литературы

1. Полиданов М. А. и др. АСПЕКТЫ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ //НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОГО. – 2020. – С. 216.
2. Калининченко А.Н. Цифровая обработка сигналов в медицинских приборах и системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 100 с.
3. Федотов А. А., Акулов С. А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. – 2013.
4. Анализ ЭКГ [Электронный ресурс]. – URL: <https://cmi.to/%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7-%D1%8D%D0%BA%D0%B3/> (дата обращения: 28.05.2025).
5. Электрокардиограф на базе ПВМ [Электронный ресурс] / Нижегородский научно-исследовательский институт радиоэлектроники. – URL: http://www.nirfi.unn.ru/wp-content/uploads/sites/31/2023/04/NIRFI_pr_1994_388.pdf (дата обращения: 28.05.2025).
6. Щербакова Т. Ф. и др. АЛГОРИТМ ПОИСКА ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК QRS-КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА //Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2019. – Т. 10. – №. 3. – С. 20-26.
7. Никифоров П. Л. Модель электрокардиографического сигнала на основе совокупности колокольных импульсов //Вестн. молодых ученых. Сер. Техн. н.(Ru). – 1998. – №. 1. – С. 64-68.
8. Абрамов М. В. Аппроксимации экспонентами временного кардиологического ряда на основе ЭКГ //Вестник кибернетики. – 2010. – №. 9. – С. 85-91.
9. Мишуров А. В. и др. Фильтрация дрейфа изоэлектрической линии при кардиологических исследованиях //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2010. – №. 6. – С. 61-63.
10. Meyer C. R., Keiser H. N. Electrocardiogram Baseline Noise Estimation and Removal Using Cubic Splines and State-space Computation Techniques // Comput. Biomed. Res. 1977.Vol. 10. P. 495–470.
11. Злочевский М. С. Обработка электрокардиограмм методами сплайн-функции // Новости мед. техники. 1983. Вып. 1. С. 18–20.

РАЗРАБОТКА НОСИМОЙ БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА И АКТИВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ ЖЕЛЧНЫХ ПРОТОКОВ

ПАРЕИШВИЛИ Г.З., СУДАКОВ Г.В., АНТОНОВ Р.Г.,

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Аннотация. Работа посвящена актуальной проблеме абдоминальной хирургии – профилактике осложнений после оперативных вмешательств на желчевыводящих путях. Послеоперационная билиарная гипертензия инициирует каскад патофизиологических изменений, включая ишемию стенки холедоха и холангиовенозный рефлюкс, что значительно повышает риск несостоятельности хирургических швов. Традиционные методы пассивного дренирования часто не учитывают динамические реологические свойства желчи и создают риск избыточной её потери. В статье представлена разработка носимой биотехнической системы, обеспечивающей непрерывный мониторинг внутрипросветного давления и адаптивную декомпрессию. Функциональная модель опирается на гидродинамические законы ламинарного течения вязких жидкостей. Измерительный тракт построен на базе MEMS-сенсора, изолированного биоинертным силиконовым эластомером. Предложен алгоритм программной компенсации полимеризационной усадки и реализации гистерезисного окна (700–1300 Па), что позволяет минимизировать риски синдрома быстрой декомпрессии и обеспечить сохранность анастомозов.

Ключевые слова: билиарная гипертензия, гидродинамика желчи, биомеханика анастомоза, носимая электроника, MEMS-датчик, реология, холангиовенозный рефлюкс.

В современной гепатобилиарной хирургии манипуляции на общем желчном протоке (холедохе) сопряжены с высоким риском развития транзиторной гипертензии. Хирургическая травма неизбежно сопровождается локальным реактивным отеком тканей и спастическими реакциями сфинктера Одди. В условиях нарушения естественного пассажа желчи внутрипросветное давление начинает стремительно расти. Согласно клиническим данным, повышение давления свыше 1300–1500 Па приводит к критическому перерастяжению стенок протока, нарушению микроциркуляции в зоне швов и последующей ишемии [1]. Главной опасностью данного состояния является механическое прорезывание лигатур в местах наложения анастомозов, что в большинстве случаев приводит к желчному перитониту. Кроме того, застой желчи провоцирует холангиовенозный рефлюкс – процесс, при котором компоненты желчи (билирубин, желчные кислоты) и бактериальные токсины проникают непосредственно в системный кровоток через поврежденные гепатоциты, вызывая печеночную недостаточность и системную интоксикацию [2]. Комплексная схема патофизиологических изменений и предлагаемая концепция декомпрессии представлены на рисунке 1.



Рис. 1 – Патофизиология билиарной гипертензии и концептуальная схема носимой биотехнической системы

Стандартные системы пассивного наружного дренирования (по Керу или Вишневскому) решают проблему сброса давления, но обладают существенными недостатками: они не позволяют контролировать давление в реальном времени и приводят к нецелевой потере всей вырабатываемой желчи, что нарушает процессы пищеварения и всасывания жиров. Разработка «умной» носимой системы декомпрессии позволяет реализовать принцип «предохранительного клапана», который сохраняет физиологическое давление и активируется только при достижении опасных порогов.

Проектирование измерительного и дренажного контуров системы требует учета реологических свойств желчи, которая является неньютоновской жидкостью. Ее вязкость зависит от концентрации желчных кислот, холестерина и наличия воспалительных компонентов. В норме динамическая вязкость (η) составляет 2–3 мПа·с, однако при патологиях (билиарный сладж, гнойный холангит) этот показатель может возрастать до 15–20 мПа·с [3].

Для расчета пропускной способности системы используется закон Гагена-Пуазейля для ламинарного потока [3]:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot L}, \quad (1)$$

где: R – внутренний радиус катетера (выбран 1.0 мм для минимизации сопротивления); ΔP – градиент давления; L – длина магистрали; η – динамическая вязкость.

Выбор диаметра трубки в 2 мм (10–12 Fr) обусловлен необходимостью предотвращения капиллярного эффекта, при котором вязкая желчь может «запирать» просвет тонкого дренажа. Гидродинамический расчет показывает, что данное сечение обеспечивает уверенный сброс давления даже при высокой вязкости субстрата.

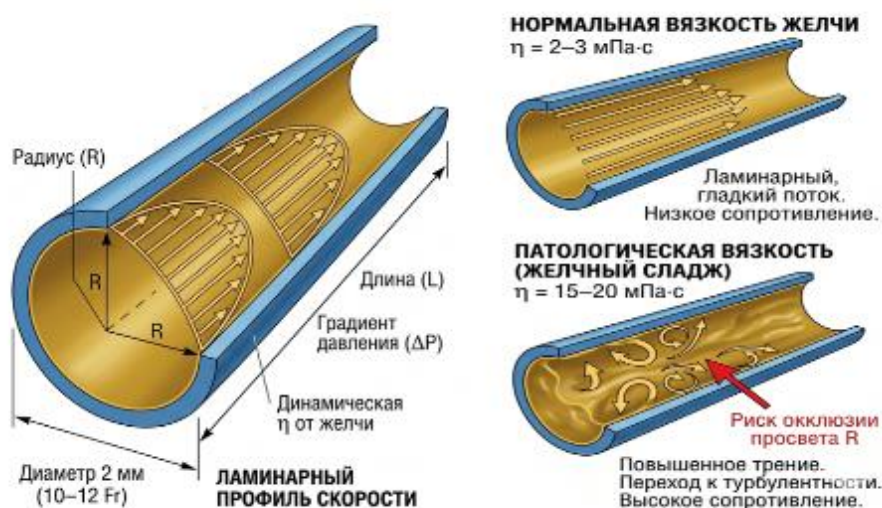


Рис. 2 – Инфографика гидродинамики и ламинарного профиля скорости течения желчи

Архитектура устройства построена на принципах модульности и автономности, что критически важно для носимого (wearable) прибора. Для реализации системы мониторинга внутрипросветного давления и адаптивной декомпрессии желчевыводящих путей была разработана структурная схема аппаратно-программного комплекса, представленная на рисунке 3. Архитектура устройства построена по модульному принципу и включает подсистемы питания, измерения, обработки данных и исполнительного управления.

Источником автономного питания устройства является аккумуляторная батарея (АКБ), обеспечивающая энергоснабжение всех функциональных узлов системы. Для согласования уровней напряжения используются два преобразователя напряжения: (ПН1) и (ПН2). Преобразователь ПН1 предназначен для питания низковольтной электронной части устройства. Преобразователь ПН2 формирует напряжение, необходимое для работы исполнительного механизма.

Измерительная подсистема построена на использовании двух датчиков давления (ДД1) и (ДД2). Первый датчик подключается к измерительной камере, соединенной с катетером, и регистрирует давление в просвете желчевыводящих путей. Второй датчик используется для измерения атмосферного давления и выполняет функцию опорного канала.

Сигналы с обоих датчиков поступают на микроконтроллер (МК), где осуществляется вычисление дифференциального давления по выражению:

$$\Delta P = P_{\text{катетер}} - P_{\text{атм}}, \quad (2)$$

Где: $P_{\text{катетер}}$ – давление в катетере; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Использование дифференциального метода измерения позволяет исключить влияние изменений атмосферного давления, связанных с погодными условиями, высотой расположения пациента или изменением внешней среды, и обеспечивает регистрацию только фактического избыточного давления в желчевыводящих путях.

После расчета значения дифференциального давления микроконтроллер выполняет обработку сигнала, фильтрацию шумов, программную компенсацию смещения нуля и реализацию алгоритма гистерезисного управления. При превышении установленного порога давления формируется управляющий сигнал на исполнительный элемент – электромагнитный клапан (ЭК).

Электромагнитный клапан обеспечивает автоматическое открытие дренажного канала для сброса избыточного давления и закрывается после возврата давления в безопасный диапазон, реализуя принцип адаптивной декомпрессии.

Таким образом, разработанная структурная схема обеспечивает автономный мониторинг дифференциального давления и управление декомпрессией с учетом реальных физиологических параметров пациента, исключая влияние внешних атмосферных факторов.

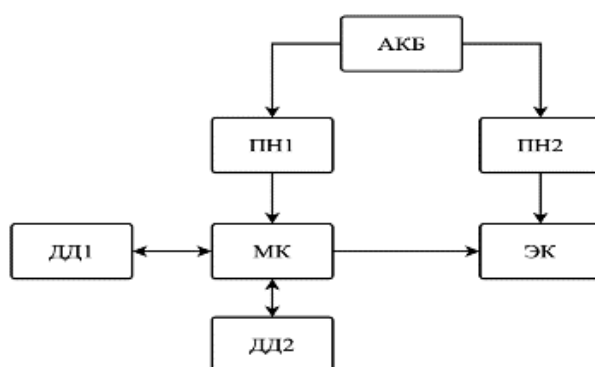


Рис. 3 – Структурная схема прибора

Основой системы является MEMS-датчик абсолютного давления BMP280. Главной инженерной сложностью при работе с биосредами является химическая агрессивность желчных кислот. Для решения этой проблемы была применена технология инкапсуляции. Чувствительный кристалл датчика изолирован слоем прозрачного биоинертного силиконового эластомера. Компаунд эффективно передает давление на диафрагму датчика, одновременно выступая физическим барьером для жидкости [4].

Для предотвращения «дребезга» клапана и имитации физиологического процесса сброса желчи применен алгоритм гистерезиса. Уровень активации ($P \geq 1300 \text{ Па}$): клапан открывается, начинается активный сброс желчи в дренажный мешок. Уровень деактивации ($P \leq 700 \text{ Па}$): клапан закрывается, восстанавливается естественный пассаж желчи.

Такой подход защищает пациента от «синдрома быстрой декомпрессии» – резкого падения давления, которое может вызвать вакуум-индуцированное кровотечение из слизистой оболочки желчных путей.

Внедрение предлагаемой биотехнической системы в практику послеоперационного ведения позволяет перейти от пассивного наблюдения к активному управлению состоянием пациента. Визуализация данных через последовательный порт (Serial Plotter) позволяет врачу наблюдать динамику сократительной способности желчных путей и реакцию сфинктерного аппарата.

Ожидаемые клинические эффекты:

1. Потенциальное снижение частоты несостоятельности анастомозов за счет уменьшения пиковых нагрузок.
2. Снижение потерь желчи за счет селективной активации дренажного канала.
3. Ранняя активизация больных благодаря компактному исполнению прибора.

Разработанная носимая биотехническая система представляет собой пример конвергенции микроэлектроники, гидродинамики и клинической хирургии. Использование доступных MEMS-решений в сочетании с алгоритмами адаптивного управления позволяет создать высокоэффективный инструмент для декомпрессии желчных путей. Дальнейшее развитие проекта предполагает интеграцию Bluetooth-модуля для передачи данных на смартфон врача и создание мобильного приложения для мониторинга состояния группы пациентов.

Список литературы

1. Lillemoe K. D., Melton G. B., Cameron J. L. Postoperative bile duct strictures: management and outcome in the 1990s / Lillemoe K. D., Melton G. B., Cameron J. L. [Электронный ресурс] // Annals of Surgery : [сайт]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11066144/> (дата обращения: 05.05.2026).
2. Wani N. A., Khan N. A. Cholangiovenous reflux in biliary obstruction and cholangitis / Wani N. A., Khan N. A. [Электронный ресурс] // PubMed : [сайт]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15564192/> (дата обращения: 05.05.2026).
3. Csendes A., Burdiles P. Physiology of bile flow and biliary pressure in the human common bile duct / Csendes A., Burdiles P. [Электронный ресурс] // PubMed : [сайт]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8310357/> (дата обращения: 05.05.2026).
4. Bosch Sensortec. BMP280 Digital Pressure Sensor Data Sheet / Bosch Sensortec [Электронный ресурс] // Bosch Sensortec : [сайт]. – URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/> (дата обращения: 05.05.2026).

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРОГРЕССИРОВАНИЯ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА

ПРОКОПЧУК К.Д.¹, БЕРЕГОВОЙ Н.В.¹, СИТДИКОВ Р.И.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»*

Аннотация. В данной статье предложена разработка аппаратно-программного комплекса (далее АПК) для удалённого мониторинга прогрессирования и реабилитации болезни Паркинсона (далее БП) у пациентов старше 55 лет, представлен алгоритм работы АПК и его подробная структурная схема.

Ключевые слова: болезнь Паркинсона, удалённый мониторинг, тремор, брадикинезия

Введение.

В ранее опубликованных работах представлена концептуальная схема аппаратно-программного комплекса для мониторинга болезни Паркинсона и выполнен анализ существующих систем регистрации диагностически значимых параметров (ДЗП), включая тремор, брадикинезию и дрейф центра тяжести пациента [1, 2]. В настоящей статье рассматривается дальнейшее развитие предложенного подхода.

Для мониторинга БП был сформирован комплекс ДЗП, отражающих природу заболевания. Перечень параметров сформирован на основе клинической шкалы оценки болезни Паркинсона MDS UPDRS [3], в которой учитываются тремор, брадикинезия и постуральная неустойчивость.

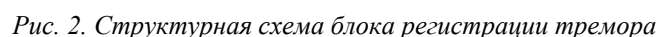
1. Амплитуда тремора рук (плотность мощности спектра сигнала);
2. Выраженность брадикинезии (графики вариабельности шага);
3. Частота появления дрейфа центра тяжести (количество дрейфов в течение дня);
4. Частота приступов тремора и брадикинезии (количество приступов в течение дня);

Для большей практичности было принято решение отказаться от канала регистрации ЭЭГ с пациента, так как шапочка для регистрации специфических всплесков БП мало эргономична и анализ активности головного мозга в большом количестве отведений требует крупных вычислительных мощностей.

Отказ от канала ЭЭГ позволит оптимизировать вычислительные мощности для детального анализа данных, поступающих с двух каналов регистрации: тремора и походки.



В структурной схеме прибора подробно описаны комплектующие датчиков тремора, походки, и блока обработки информации. Каждый из этих блоков представлен на рисунках 2, 3 и 4 соответственно.



ЭМГ, регистрируемая двумя электродами с предплечий пациента (в схеме – БО, биологический объект) – аналоговый сигнал, требующий усиления и фильтрации от различных помех, которые могут возникнуть в повседневной деятельности человека с носимым устройством. Для совмещения функции фильтрации и усиления было принято решение использовать микросхему типа Analog Front End (AFE), вместо разработки блока усиления и фильтрации на ОУ, так как эта микросхема будет гораздо компактнее, выполнять ту же функцию и, зачастую, снабжена встроенным АЦП. ИИМ – совокупность акселерометра, магнитометра и гироскопа, на выходе уже имеет цифровой сигнал. Данные с обоих типов датчиков передаются по Bluetooth каналу пакетами данных. Антенна должна иметь возможность передавать информацию с обоих датчиков в практически реальном времени, следовательно, должна иметь большую скорость передачи.

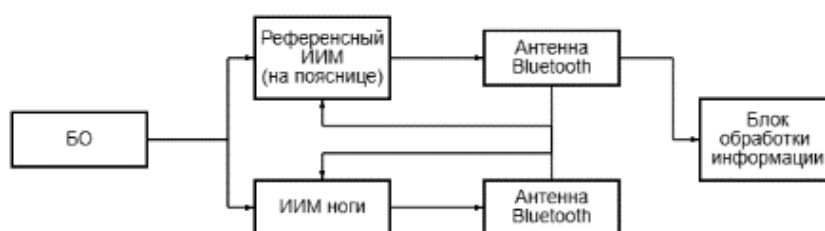


Рис. 3. Структурная схема блока регистрации походки

Данные о походке пациента делятся на два типа: шаг и положение центра тяжести; для каждого типа предусмотрен свой ИИМ – референсный, расположенный на поясице, отвечает за положение центра тяжести человека, а также относительно него рассчитываются координаты положения ИИМ ног, для определения длины и высоты шага. Оба формата ИИМ регистрации походки сопряжены между собой по тому же Bluetooth каналу. Референсный ИИМ является ведущим, поэтому данные, требуемые для расчёта ДЗП передаются пакетом через его линию Bluetooth на блок обработки информации.

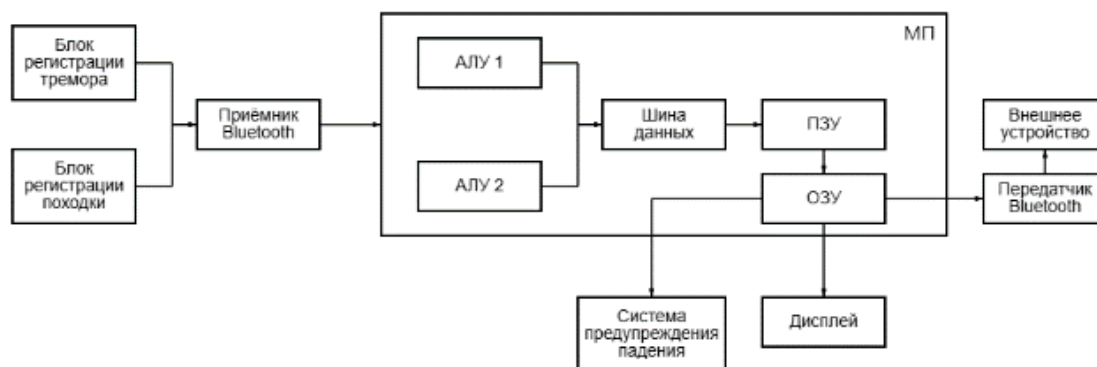


Рис. 4. Структурная схема блока обработки информации

Данные, поступающие с двух вышеописанных каналов регистрации, являются цифровыми, поэтому есть возможность сразу направить их на обработку в микропроцессор. Для возможности параллельной обработки сигналов МП должен иметь несколько АЛУ в своей структуре. Полученные ДЗП в виде ЭМГ и акселерометрической треморограмм, графиков вариабельности шага и дрейфа центра тяжести, поступают через шину данных в ПЗУ, далее они копируются в ОЗУ для возможности вывода данных на дисплей или внешнее устройство. Также в системе предусмотрена система предупреждения падений,

сигнализирующая пациенту о слишком сильном наклоне с просьбой опереться о ближайший устойчивый объект.

Алгоритм работы АПК

Алгоритм работы АПК представлен в виде блок-схемы на рисунке 5.

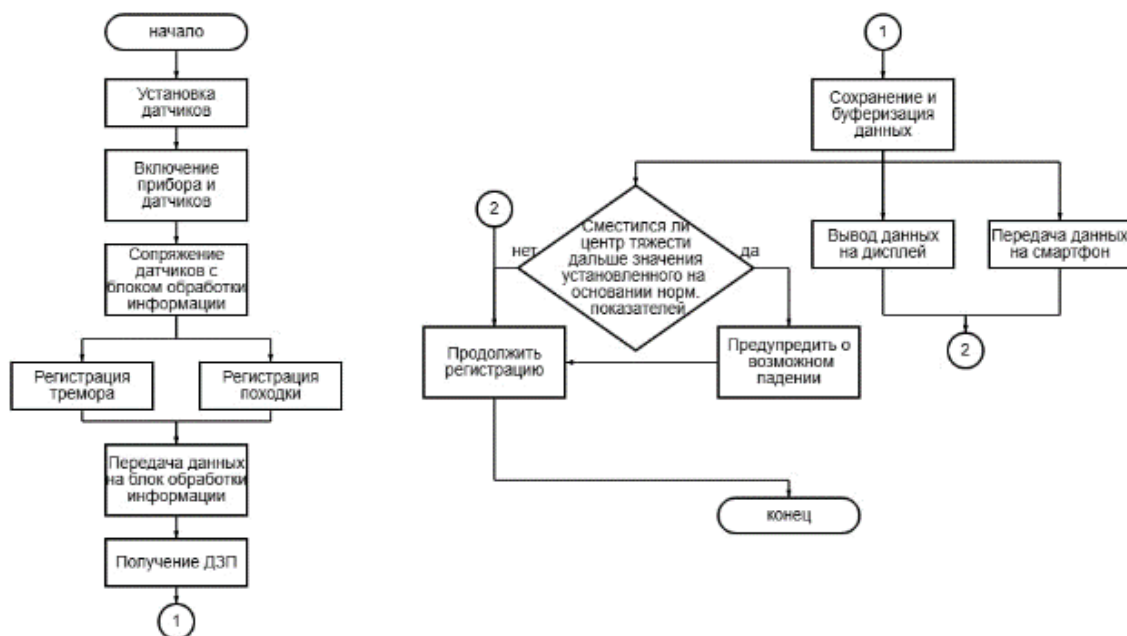


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы АПК

Алгоритм начинается с оснащения пациента носимым устройством и расположением на нём датчиков, далее прибор и датчики включаются и сопрягаются между собой, начинается регистрация данных. Информация передаётся на МП, где параллельно вычисляются ДЗП, далее они сохраняются и буферизуются для вывода на дисплей или смартфон, параллельно идёт проверка о смещении центра тяжести пациента дальше безопасного положения, если смещения нет – запись продолжается, иначе происходит предупреждение падения.

Заключение

В данной работе предложена и обоснована структурная разработка АПК для дистанционного мониторинга прогрессирования и реабилитации болезни Паркинсона, дальнейшей целью является разработка алгоритмов расчёта ДЗП и принципиальных схем каждого из блоков АПК, макетирование прибора и проверка точности его работы.

Список литературы (стиль – «Литература»)

1. Прокопчук К. Д., Береговой Н. В. Разработка концептуальной модели аппаратно-программного комплекса для мониторинга болезни Паркинсона // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2025 / под ред. В. И. Жулева. – Рязань : ИП Коняхин А.В. (Издательство «Книжный Жук»), 2025. – С. 95–99.
2. Prokopchuk K.D. The Problem of Developing Hardware System for Monitoring the Development of Parkinson's Disease. 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Communication and Networking, Signal Processing & Analysis, Biomedical and Environmental Engineering (ElCon-CN).
Goetz C. G. et al. Movement Disorder Society-sponsored revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): scale presentation and clinimetric testing results

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ТКАНЕИМИТИРУЮЩЕГО ФАНТОМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УВЧ-ТЕРАПИИ

ПУСТОВАЛОВ А.В., ЕРМОЛАЕВ Д.Д., БЛАЖНОВ Д.Ю., СОТНИКОВ И.В. СЕРЖАНТОВА Н.А.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Аннотация. Использование фантомов позволяет проводить экспериментальные исследования, тестировать медицинские устройства и оптимизировать параметры воздействия без риска для пациента, однако проблема подбора оптимального состава для фантомов, применяемых именно в УВЧ-терапии, остается недостаточно изученной. В статье рассматриваются результаты экспериментов по действию УВЧ-излучения на материалы, потенциально способные имитировать свойства биологических тканей: силикон, флористическая губка, гидрогель «Водохлеб», гидрогель шариковый. Полученный результат указывает на то, что силикон, несмотря на свои удобные механические свойства и стабильность, не является подходящим материалом для моделирования тепловых эффектов, возникающих в биологических тканях при УВЧ-терапии. Вместе с тем комбинация гидрогелевой среды и силиконовой матрицы с термохромными пигментами представляет собой перспективный подход к созданию фантомов с функцией визуализации тепловых полей при УВЧ-терапии.

Ключевые слова: УВЧ-терапия, фантом, материал, силикон, гидрогель

Ультравысокочастотная (УВЧ) терапия является одним из широко применяемых методов физиотерапевтического воздействия, основанного на использовании электромагнитного поля высокой частоты для стимуляции биологических тканей. УВЧ-терапия оказывает на ткани осцилляторный эффект, который характеризуется изменением биологической структуры клеток на физико-химическом и молекулярном уровне, а также тепловой эффект, который приводит к нагреву тканей организма путем превращения ультравысоких частот электромагнитного поля в тепловую энергию. Данный метод активно применяется в клинической практике благодаря его способности улучшать микроциркуляцию, ускорять регенерационные процессы и оказывать противовоспалительное действие. Однако эффективность и безопасность УВЧ-терапии во многом зависят от точности дозирования и контроля распределения электромагнитного поля в тканях пациента [1].

Одной из актуальных задач является разработка методов мониторинга и калибровки оборудования УВЧ-терапии. В этом контексте особое значение приобретают физические модели – фантомы, имитирующие электрические и тепловые свойства биологических тканей. Использование фантомов позволяет проводить экспериментальные исследования, тестировать медицинские устройства и оптимизировать параметры воздействия без риска для пациента [2].

Ключевым аспектом при создании фантомов является выбор материалов, способных адекватно воспроизводить диэлектрические, теплопроводные характеристики живых тканей в диапазоне УВЧ. Материалы должны обладать стабильностью свойств, воспроизводимостью, биологической инертностью и технологической доступностью. При этом важно учитывать влияние частоты, температуры и влажности на их поведение.

Несмотря на существующие разработки в области тканезквивалентных материалов, проблема подбора оптимального состава для фантомов, применяемых именно в УВЧ-терапии, остается недостаточно изученной. Это обусловлено сложностью моделирования структуры тканей и их неоднородных свойств [3]. На данный момент существуют только

калибраторы УВЧ, но модели, которая бы отображала нагрев и распределение тепла в теле еще нет.

Целью данной работы является анализ и обоснование выбора материалов для создания фантома, предназначенного для отслеживания и оценки параметров УВЧ-терапии.

Для проведения исследований использовались аппарат УВЧ-терапии «УВЧ-60-МедТеКо» и инфракрасный бесконтактный пирометр AIQUE. Воздействие электромагнитным полем частотой 27,12 МГц и мощностью 50 Вт осуществлялось в течение 15 минут. В качестве объектов исследования были выбраны четыре типа материалов, потенциально способных имитировать свойства биологических тканей: силикон, флористическая губка, гидрогель «Водохлеб», гидрогель шариковый. Выбор данных материалов обусловлен их распространённостью в моделировании биологических сред, а также различиями в их физических свойствах, прежде всего – в содержании влаги и диэлектрических характеристиках, которые напрямую влияют на поглощение электромагнитной энергии в диапазоне УВЧ.

В рамках разработки фантома для визуализации распределения температуры при УВЧ-терапии была проведена серия экспериментов с использованием термочувствительных (термохромных) красок, инкапсулированных в силиконовую основу. Основной задачей данного этапа являлась оценка возможности визуальной регистрации температурных изменений под воздействием УВЧ-поля. Термохромные пигменты равномерно вводились в силиконовую матрицу на этапе её подготовки, после полимеризации силикона формировались тестовые образцы. Использовались два вида термохромных пигментов: с изменением окраски при 30 °С, цвет желтый/белый и с изменением окраски при 22 °С, цвет оранжевый/розовый. Образцы с желтым термохромным пигментом под действием УВЧ поля не изменили окраску в течении 15 минут. Образцы с оранжевым термохромным пигментом через 15 минут значительно обесцветились. Однако контрольный образец, на который не действовало УВЧ-излучение и который находился на воздухе для отслеживания динамики цвета при воздействии комнатной температуры, также обесцветился. Это свидетельствует об отсутствии значимого повышения температуры в силиконовой матрице под действием электромагнитного поля, что указывает на низкое поглощение УВЧ-энергии данным материалом. Полученный результат указывает на то, что силикон, несмотря на свои удобные механические свойства и стабильность, не является подходящим материалом для моделирования тепловых эффектов, возникающих в биологических тканях при УВЧ-терапии.

В ходе второго эксперимента в качестве потенциального компонента фантома для УВЧ-терапии рассматривалась флористическая губка. Данный материал широко используется для удержания воды и характеризуется выраженной пористой структурой, что делает его потенциально пригодным для имитации водонасыщенных биологических тканей.

Флористическая губка представляет собой пористый материал с высокой способностью к абсорбции жидкости. В сухом состоянии она обладает низкой плотностью, однако при насыщении водой её физические свойства существенно изменяются, в частности увеличивается её диэлектрическая проницаемость, что может влиять на взаимодействие с электромагнитным полем УВЧ-диапазона.

Результаты показали, что температура губки не изменилась за время эксперимента. Дополнительно проводился еще один опыт, когда губку выдерживали в теплой воде, чтобы оценить влияние воздействия УВЧ-излучения на остывание образца (по сравнению с контрольным, остывающим на воздухе). Второй эксперимент также не показал существенных различий между опытным и контрольным образцом.

Третий эксперимент проводился с использованием гидрогеля «Водохлеб». Гидрогель «Водохлеб» продемонстрировал умеренное повышение температуры: с 33 °С до 34 °С в течение 15 минут воздействия (по сравнению с контрольным образцом). Это позволяет сделать вывод о стабильной и предсказуемой реакции материала на УВЧ-воздействие, однако сравнительно небольшая амплитуда нагрева при невысокой точности пирометра осложняет применение данного материала в качестве фантома. Дополнительно была выполнена попытка интегрировать термохромный пигмент в гидрогелевую среду. Опыт показал, что пигменты являются гидрофильными, обволакивают гранулы гидрогеля и препятствуют их набуханию.

Четвертый эксперимент выполнялся с шариковым гидрогелем, который показал повышение температуры до 36 °С. Однако начальная температура образца не была достоверно зафиксирована (находилась вне пределов измерения пирометра), что затруднило количественную оценку степени нагрева. Тем не менее, сам факт изменения температуры указывает на способность материала взаимодействовать с УВЧ-полем.

Полученные данные подтверждают ключевую роль содержания воды в материале при взаимодействии с УВЧ-излучением. Материалы с высоким содержанием влаги (гидрогели) демонстрируют заметную реакцию на воздействие, тогда как гидрофобные материалы, такие как силикон, практически не поглощают энергию поля.

Значительный нагрев гидрогеля в четвертом эксперименте показывает его потенциал для изготовления фантома, однако в чистом виде использовать данный материал не удобно – невозможно визуально оценить распределение электромагнитного поля УВЧ-диапазона, количественные измерения сопряжены с погрешностями и сложностями локализации. Поэтому было принято решение выполнить комбинированный эксперимент. Силиконовые образцы с внедрёнными термохромными пигментами двух видов были помещены в среду шарикового гидрогеля и подвергались воздействию УВЧ-излучения (рис. 1).



Рис. 1. Изменение цвета окрашенных термохромными пигментами силиконовых образцов в гидрогелевой среде: а) в начальный момент времени, б) через 10 минут

В данном случае было зафиксировано изменение цвета термохромных красок. Наблюдаемый эффект свидетельствует о том, что нагрев происходил за счёт поглощения электромагнитной энергии гидрогелем с последующей передачей тепла силиконовым образцам. Таким образом, силикон в данном случае выступал в роли инертной матрицы, в которой регистрировались температурные изменения, обусловленные окружающей средой. При этом изменения более заметны у образцов окрашенных желтым пигментом. Через 10 минут такой образец обесцветился полностью. Образец с оранжевым пигментом изменяет

окраску при более низкой температуре (в том числе на воздухе), поэтому изменение цвета у него менее выражено.

Полученные результаты демонстрируют принципиально важное различие между прямым и косвенным нагревом материалов в УВЧ-поле. Силикон, обладая низкими диэлектрическими потерями, не нагревается непосредственно под действием УВЧ-излучения, что делает невозможным регистрацию температурных изменений без использования дополнительной среды. В то же время, применение гидрогелей, способных эффективно поглощать электромагнитную энергию, позволяет создавать условия для опосредованного нагрева. В такой системе термохромные краски, внедрённые в силикон, могут выступать в качестве визуальных индикаторов распределения температуры.

Следовательно, комбинация гидрогелевой среды и силиконовой матрицы с термохромными пигментами представляет собой перспективный подход к созданию фантомов с функцией визуализации тепловых полей при УВЧ-терапии.

Список литературы

1. Юсупов Ф.А., Юлдашев А.А. Ультравысокочастотная терапия в неврологии // The Scientific Heritage, - 2022. - № 93. - С. 48-52.
2. Захаров И.Д., Петрова П.В. Медицинский фантом // Образовательный вестник «Сознание», - 2017. - №19(12). С. 126-127.
3. Макаров В.Н., Шмелева Д.В., Боос Н.А. Фантом для контроля процесса термоабляции // Российский технологический журнал. – 2021. №9(1). С. 73–78. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-73-78>

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ПЛОТНОСТЕЙ КУЛЬТИ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

РЫЖАКОВА Д.В., ПОДОКСЕНОВ А.А.

*«Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»*

Аннотация. Протезирование конечностей требует индивидуального изготовления культеприемной гильзы с учетом не только геометрических параметров культи, но и внутренней морфологии мягких тканей. В работе представлена концепция аппаратно-программного комплекса, совмещающего электроимпедансную томографию и 3D-сканирование. Разработана структурная схема прибора, предназначенного для оценки структуры мягких тканей культи посредством построения карты распределения проводимости.

Ключевые слова: биоимпеданс, культя, электроимпедансная томография, карта проводимости

Введение

Протезирование конечностей является одной из наиболее динамично развивающихся областей современной реабилитационной медицины. Изготовление культеприемной гильзы является ключевой задачей протезирования, так как гильза распределяет механическую нагрузку от протеза к тканям. Культи представляет собой часть конечности, которая сохранилась после ампутации, экзартикуляции или травмы. В послеоперационный период в культе происходят структурные изменения, включающие в себя атрофию мышечной ткани, уплотнения подкожной клетчатки, формирование зон рубцевания и отеков [1].

При проектировании гильзы необходимо учитывать не только геометрические параметры культи, но и внутреннюю морфологию тканей. Среди факторов, которые влияют

на форму гильзы, выделяют зоны рубцевания (участки соединительной ткани, образующиеся после повреждения), уплотнения (скопления серозной жидкости в подкожной клетчатке в зоне послеоперационного шва), атрофированные ткани и отечные области. Нагружаемые (опорные) зоны должны располагаться на анатомически устойчивых участках, в то время как области с выраженной отечностью, рубцовыми структурами или измененной толщиной мягких тканей требуют разгрузки, чтобы исключить избыточное давление.

Современная оценка состояния культи базируется на визуальном осмотре и пальпации, что не позволяет протезисту проводить дистанционную диагностику. Появление технологий 3D-сканирования позволило получать геометрическую модель культи, однако такая модель не несет информации о внутренней структуре мягких тканей. Следовательно, трехмерное сканирование не может использоваться как самодостаточный метод диагностики состояния культи при проектировании гильзы. Предлагаемая концепция аппаратно-программного комплекса решает эту проблему посредством совмещения технологий 3D-сканирования и метода электроимпедансной томографии. Прибор строит карту проводимости тканей культи и накладывает ее на 3D-модель, которая была получена с помощью сканера.

Обоснование методики

Электроимпедансная томография относится к методам медицинской диагностики, в основе которых лежит регистрация электрических свойств биологических объектов. Через ткани пропускается малый переменный ток, а матрица из электродов последовательно измеряет напряжение в десятках участков. На основе полученных данных специализированное программное обеспечение строит карту распределения проводимости [2].

Импеданс биологического объекта Z является комплексной величиной:

$$Z = R + jX \quad (1)$$

где R – активная составляющая импеданса, связанная с проводимостью внутриклеточной и внеклеточной жидкостей,

X – реактивная составляющая импеданса, обусловленная емкостными свойствами клеточных мембран, выступающих диэлектрическими перегородками между проводящими средами,

j – мнимая единица.

Удельная электропроводность биологических тканей определяется содержанием в них воды. Отечные области проводят ток лучше, чем рубцовые, уплотнённые или атрофированные участки, благодаря чему появляется возможность косвенно судить об их плотности. В таблице 1 представлены значения и доверительные интервалы удельных сопротивлений тканей с уровнем значимости 5%.

Таблица 1

Удельное сопротивление биологических тканей

Ткань	Среднее значение удельного сопротивления, Ом·м	95% доверительный интервал, Ом·м
Берцовая кость	4,64	3,6-5,97
Берцовая кость	176	123-252
Жир	38,5	30,5 – 48,7

Кожа	3,29	2,55 – 4,24
Кость	$1,24 \cdot 10^6$	$(0,91 – 1,69) \cdot 10^6$
Кровь	1,51	1,20 – 1,91
Мышцы (вдоль волокон)	2,40	1,55 – 3,72
Мышцы (поперек волокон)	6,75	4,35 – 10,5

Ключевой особенностью биологических тканей является зависимость их электрических свойств от частоты (дисперсия). Наибольшее значение для измерения биоимпеданса имеет β -дисперсия, наблюдаемая в диапазоне десятков килогерц, которая обусловлена емкостными свойствами клеточных мембран [3,4].

На низких частотах (единицы килогерц и ниже) емкостное сопротивление мембран велико, вследствие чего ток не проникает внутрь клеток и распространяется преимущественно по внеклеточному пространству. С увеличением частоты емкостное сопротивление уменьшается, и ток начинает частично проникать во внутриклеточное пространство. Данный диапазон соответствует β -дисперсии и обеспечивает получение характеристики тканей, учитывающей их структурные особенности. На высоких частотах (>100 кГц) увеличивается вклад внутриклеточной проводимости, ток свободно проникает внутрь клеток, но контраст между различными типами тканей снижается, а влияние паразитных емкостей возрастает, что может ухудшать качество реконструируемого изображения [5-7].

В данной работе в качестве несущей выбрана частота 50 кГц. Данная частота, являющаяся стандартом при одночастотном методе измерения электропроводимости, снижает влияние межэлектродных импедансов и паразитной емкости, а также обеспечивает стандартизацию методики и позволяет сопоставлять результаты с данными других исследований.

Структурная схема прибора

На рисунке 1 представлена структурная схема разрабатываемого аппаратно-программного комплекса.

Формирование возбуждающего сигнала с рабочей частотой 50 кГц осуществляется методом прямого цифрового синтеза на микросхеме AD9833. Сформированное синусоидальное напряжение через стабилизатор тока подается на исследуемый объект. Измерение разности потенциалов осуществляется с помощью многоэлектродной системы, расположенной по периметру культи, при этом отведения формируются по биполярной схеме. Коммутация пар электродов реализована на аналоговых КМОП-мультиплексах. Последовательность переключений управляется микроконтроллером по алгоритму, обеспечивающему получение полного массива данных для реконструкции распределения проводимости [8-11].

Первичное усиление измеряемого сигнала и согласование сопротивлений осуществляется инструментальным усилителем с высоким коэффициентом подавления синфазных помех. Далее сигнал проходит активную фильтрацию на операционных усилителях, реализованную в виде каскадного соединения фильтра верхних и нижних частот первого порядка, что эквивалентно полосовому фильтру второго порядка. Основное усиление выполняется инвертирующими усилителями с низким выходным сопротивлением; для сохранения фазы используется каскад из двух последовательно включённых инвертирующих усилителей.

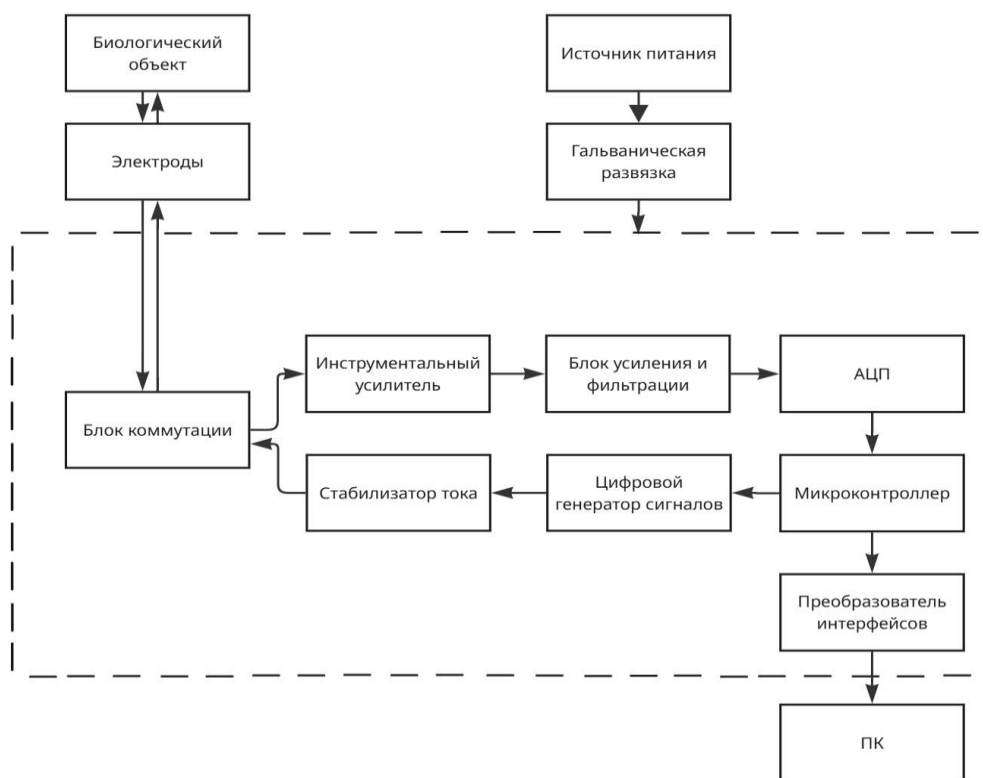


Рисунок 1 – Структурная схема прибора

Аналого-цифровое преобразование выполняется внешним 14-битным АЦП с частотой дискретизации 800 кГц, что обеспечивает избыточное временное разрешение и снижает влияние наложения спектров. Несущая частота 50 кГц не содержит полезной информации – данные об импедансе закодированы в огибающей модулированного сигнала. Выделение низкочастотной информативной составляющей выполняется блоком детектирования [16]. В работе используется цифровое синхронное детектирование, реализованное в микроконтроллере: оцифрованный сигнал умножается на опорные последовательности отсчётов, в следствие чего выделяются квадратурные составляющие, пропорциональные амплитуде и фазовому сдвигу полезного сигнала.

Передача цифровых данных от микроконтроллера к персональному компьютеру осуществляется через преобразователь интерфейсов USB-UART с оптической гальванической развязкой. Гальваническая развязка также присутствует в цепи питания, что обеспечивает полную электробезопасность пациента. Обработка данных выполняется специализированным программным обеспечением, которое реконструирует распределение проводимости в виде цветовой карты и накладывает его на трёхмерную модель культи, полученную с использованием 3D-сканирования [12].

Заключение

Результаты работы демонстрируют перспективность использования электроимпедансной томографии при оценке морфологии тканей культи. Предложен аппаратно-программный комплекс, объединяющий электроимпедансную томографию и трёхмерное сканирование. Разработанные структурная схема и алгоритм функционирования комплекса являются основой для последующей технической реализации прибора.

Список литературы

1. Гадяцкий А.В., Задерей Ю.Н., Качер В.С., Тимофеев И.Л. Измерение давления в культеприёмной гильзе протеза – часть комплексной оценки качества протезирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2011. – С. 5–6.
2. Тихомиров А.М. Импеданс биологических тканей и его применение в медицине // Российский государственный медицинский университет, 2006.
3. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. – М.: Наука, 2009. – 392 с.
4. Faes T.J.C., Van der Meij H.A., De Heethaar R.M. The electric resistivity of human tissues (100 Hz – 10MHz): a meta-analysis of review studies // Physiol. Meas. – 1999. – Vol.20. – P.R1–R10.
5. Николаев Д.В., Щелыкалина С.П. Лекции по биоимпедансному анализу состава тела человека. – М., 2016. – 152 с.
6. Cornish B.H., Thomas B.J., Ward L.C. Improved prediction of extracellular and total body water using impedance loci generated by multiple frequency bioelectrical impedance analysis // Phys. Med. Biol. – 1993. – Vol.38.
7. Липатов А.И. Погрешности при измерении биоимпеданса // Молодой ученый. – 2015. – № 15 (95). – С. 297–299.
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 1993.
9. Ефимов И.П. Проектирование электронных фильтров. – Ульяновск, 1999.
10. Direct Digital Synthesis // Stanford Research Systems, 2012.
11. Тюрин В.А. Метод прямого цифрового синтеза в генераторах сигналов специальной формы SFG-2110 и АКПП-3410/3: учебно-методическое пособие. – Казань: Казанский федеральный университет, 2015. – 74 с.
12. Степанов А.В. Синхронный детектор // Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2022.

НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ПОЛИСАХАРИДНЫМИ ОБОЛОЧКАМИ НА УГЛЕРОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БИОСЕНСОРОВ

ТАРАСЕНКО А.Д. 1

¹Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Печатные углеродные электроды представляют большой интерес для создания электрохимических биосенсоров благодаря простоте изготовления, низкой стоимости, воспроизводимости и возможности массового производства. Модификация таких электродов наноматериалами на основе железа рассматривается как перспективный путь повышения электроактивной площади и изменения межфазного переноса заряда. Модификация SPCE железосодержащими наночастицами усиливает электронный перенос, а сами SPCE описаны как простая, быстрая, недорогая и одноразовая платформа для биосенсорики.

Ключевые слова: оксид железа, магнитные наночастицы, печатный углеродный электрод, импедансная спектроскопия, циклическая вольтамперометрия.

Введение

В рамках разработки импедансных биосенсоров актуальной задачей является поиск оптимального материала электродов, сочетающего высокую чувствительность и стабильность отклика. В данной работе исследовано электрохимическое поведение наноструктур на основе оксида железа, покрытых различными углеводными оболочками, при их нанесении на углеродные печатные электроды. Рассмотрены оболочки из фруктозы, глюкозы и сахарозы с целью выбора наиболее перспективного варианта для дальнейшего применения в биосенсорных системах. Комплексная характеристика образцов выполнена с использованием динамического рассеяния света для оценки гидродинамического размера

частиц, растровой электронной микроскопии для анализа морфологии поверхности, а также электрохимических методов, включающих циклическую вольтамперометрию и импедансную спектроскопию.

Технология получения и инкапсуляции наноструктур

Синтез наноструктур на основе оксида железа реализуется в два этапа, сочетающих метод химического соосаждения и последующую гидротермальную модификацию поверхности. На первой стадии осуществляется получение ядер магнетита (Fe_3O_4) путем взаимодействия солей двух- и трехвалентного железа в щелочной среде. В дезоксигенированном водном растворе готовится смесь хлоридов FeCl_2 и FeCl_3 в строго определенном молярном соотношении 1:2. Данная смесь вводится при интенсивном механическом перемешивании в раствор гидроксида натрия, что обеспечивает мгновенную нуклеацию и рост наночастиц при уровне pH 11–12. Полученный мелкодисперсный осадок подвергается магнитной сепарации, многократной промывке до нейтрального состояния [1].

Вторая стадия технологического процесса заключается в инкапсуляции синтезированных ядер в защитную полисахаридную оболочку для обеспечения биосовместимости и предотвращения агрегации. В качестве органического прекурсора используется раствор глюкозы, сахарозы и фруктозы, который смешивается с подготовленной суспензией наночастиц до достижения гомогенного состояния. Процесс формирования оболочки проводится в изотермических условиях в гидротермальном реакторе высокого давления. Гидротермальный синтез протекает при температуре 160°C в течение 24 часов, в результате чего за счет частичной карбонизации сахара вокруг неорганического ядра образуется плотный полисахаридный слой. Полученные нанокомпозиты, сочетающие высокие магнитные характеристики и стабильность, очищаются методом многократной промывки и декантации, после чего могут быть интегрированы в состав чувствительного слоя электрохимических биосенсоров на базе углеродных печатных электродов [2].

Результаты

По данным динамического рассеяния света установлено, что исследуемые частицы формируют дисперсии с гидродинамическим размером порядка 150 нм для фруктозы, 100 нм для глюкозы, 100 нм для сахарозы. В литературе сахаросодержащие покрытия рассматриваются как удобный способ получения вододиспергируемых железоксидных наночастиц с регулируемыми межфазными свойствами, что дополнительно подтверждает актуальность выбранного подхода.

Морфологию покрытий на основе магнетита, инкапсулированного в сахарозу, исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) непосредственно на поверхности печатного углеродного электрода. На полученном РЭМ-изображении (Рис. 1) видно, что частицы формируют пористую структуру.

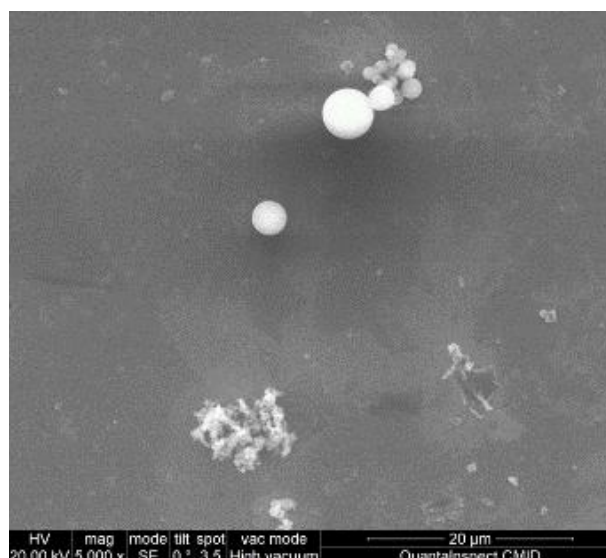


Рисунок 1 - РЭМ-изображение частиц магнетита, инкапсулированных в сахарозу, на поверхности печатного углеродного электрода

Электрохимические измерения показали выраженную зависимость отклика от природы углеводной оболочки. По данным импедансной спектроскопии наименьший размер высокочастотной полуокружности среди образцов с углеводными оболочками наблюдался для наночастиц с сахарозой. Оценка по ширине дуги Найквиста дает для сахарозного образца величину порядка 1,21 кОм, тогда как для фруктозного и глюкозного образцов она составляет примерно 2,47 кОм и 2,96 кОм соответственно. Это указывает на более низкое сопротивление переносу заряда и меньшую степень блокирования поверхности именно в случае сахарозной оболочки. Данные циклической вольтамперометрии согласуются с этим выводом: сахарозный образец демонстрирует наибольший анодный пик среди образцов с углеводными оболочками (около 0,059 мА) и наименьшее значение разности потенциалов пиков (около 529 мВ), тогда как для фруктозы и глюкозы составляет примерно 564 мВ и 594 мВ. Совокупно это свидетельствует о том, что сахарозная оболочка в меньшей степени ухудшает электронный обмен на границе электрод/раствор и формирует наиболее перспективный интерфейс для последующей биофункционализации.

С помощью электрохимической импедансной спектроскопии получены концентрационные зависимости отклика сенсора на целевой пептид в диапазоне от 100 пг/мл до 1 нг/мл, демонстрирующие монотонный рост сопротивления переносу заряда.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что варьирование типа полисахаридной оболочки наноструктур на основе оксида железа позволяет изменять электрохимические характеристики модифицированных углеродных печатных электродов. Использование сахарозной оболочки обеспечивает формирование оптимального интерфейса с благоприятным сочетанием морфологических свойств и высокой эффективностью переноса заряда. Данный образец характеризуется развитой активной поверхностью и стабильностью сигнала, что делает его наиболее перспективным для иммобилизации биорецепторов. Таким образом, наноструктуры с сахарозной оболочкой могут рассматриваться как оптимальная технологическая платформа для высокочувствительного безметочного детектирования целевых белков методом электрохимической импедансной спектроскопии.

Список литературы

1. Kang, Y. S. Synthesis and Characterization of Nanometer-Size Fe₃O₄ and γ -Fe₂O₃ Particles / Y. S. Kang, S. Risbud, J. F. Rabolt, P. Stroeve // Chem. Mater. — 1996. — Vol. 8, no. 9. — P. 2209–2211.
2. Гареев, К. Г. Разработка методов поверхностной модификации магнитных наночастиц защитной оболочкой из сахаридов / К. Г. Гареев, В. С. Пугач, Н. В. Евреинова [и др.] // Биотехносфера. — 2017. — № 3(51). — С. 76–81.
3. Li, Y. Laser ablation of screen-printed carbon electrodes for portable glucose sensing / Y. Li, L. Huang, Y. Chen [et al.] // Microchemical Journal. — 2025. — Vol. 219. — Art. 115842.

РАЗРАБОТКА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО МИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ

ФАДЕЕВА В.К., РЫБАКОВ И.А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Проф. Попова, 5 лит. Ф, Санкт-Петербург, 197022

Аннотация. В работе рассматривается разработка прототипа персонализированного миоэлектрического протеза кисти. Основная идея заключается в совмещении индивидуального проектирования корпуса по 3D-скану сохранной конечности и управления приводами по электромиографическим сигналам. В качестве базовых движений выбраны силовой хват и точечный хват большим и указательным пальцами. На текущем этапе подготовлена схема персонализации корпуса, собрана и проверена аппаратная часть прототипа: два ЭМГ-модуля, микроконтроллер Arduino Nano, драйвер DRV8833 и два независимых приводных канала. Полученные результаты позволяют использовать выбранную конфигурацию для дальнейшей интеграции механической части и проверки базовых хватов.

Ключевые слова: протез кисти, миоэлектрическое управление, электромиография, 3D-сканирование, персонализация, аддитивные технологии.

Введение

Потеря кисти ограничивает выполнение повседневных действий, связанных с захватом и удержанием предметов. Поэтому разработка протезов верхней конечности остаётся важной задачей протезирования и реабилитации. Согласно стандартам Всемирной организации здравоохранения, протезно-ортопедическая помощь является одним из направлений восстановления самостоятельности и мобильности пациента [1].

Современные активные протезы кисти позволяют частично компенсировать утраченные функции, однако такие устройства часто имеют высокую стоимость и ограниченные возможности индивидуализации. При этом для пользователя важны не только функциональные характеристики, но и внешний вид изделия, удобство ношения и степень соответствия протеза индивидуальным особенностям тела.

Одним из распространённых способов управления активными протезами является регистрация миоэлектрических сигналов с мышц предплечья [2]. Для расширения числа управляющих состояний применяются методы распознавания паттернов ЭМГ-сигналов [3]. Одновременно с этим 3D-сканирование и аддитивные технологии позволяют создавать индивидуализированные протезно-ортопедические изделия сложной формы [4, 5]. Внешний вид протеза и участие пользователя в его косметическом проектировании могут положительно влиять на восприятие изделия и пользовательский опыт [6].

В данной работе рассматривается прототип персонализированного протеза кисти, в котором индивидуальная геометрия корпуса формируется на основе 3D-скана контралатеральной конечности, а управление предполагается выполнять по электромиографическим сигналам.

Персонализация корпуса

Для формирования внешней геометрии протеза используется 3D-сканирование сохранной, или контралатеральной, кисти. В рассматриваемом варианте моделируется ситуация утраты левой кисти при сохранной правой кисти. Исходная цифровая модель правой кисти зеркалируется, после чего полученная геометрия используется как основа для проектирования корпуса левого протеза.

При этом 3D-скан нельзя напрямую использовать как готовую CAD-модель. Он содержит избыточную детализацию, локальные дефекты поверхности и не имеет внутренних посадочных мест под механические элементы. Поэтому после зеркалирования модель должна пройти этапы очистки сетки, упрощения геометрии и адаптации формы под размещение приводов, тяг, шарниров и элементов крепления.

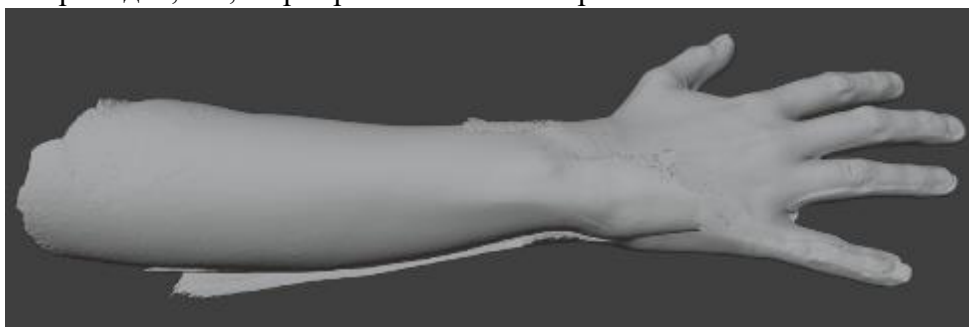


Рис. 1. Исходная необработанная цифровая модель сохранной правой кисти, полученная методом 3D-сканирования.

В данной работе скан сохранной конечности рассматривается не как точная биомеханическая копия кисти, а как основа для персонализированной внешней оболочки. Такой подход позволяет сохранить индивидуальные особенности формы руки пользователя и одновременно оставить возможность инженерной доработки корпуса под механическую часть протеза.



Рис. 2. Цифровой цикл персонализации протеза кисти на основе 3D-сканирования контралатеральной конечности

Конструкция протеза

Прототип включает персонализированный корпус и исполнительный механизм, предназначенный для реализации базовых хватов. В качестве основных движений выбраны силовой хват и точечный хват. Силовой хват необходим для удержания объектов цилиндрической или близкой к ней формы, а точечный хват используется для взаимодействия с небольшими предметами.

Для снижения сложности прототипа механическая часть строится по упрощённой схеме. Передача движения от приводов к пальцам предполагается с использованием гибких тяг, обеспечивающих сгибание фаланг при вращении вала двигателя. Возврат пальцев в исходное положение может выполняться за счёт упругих элементов или конструкционной упругости отдельных деталей.

На данном этапе конструкция рассматривается как демонстрационный прототип. Основной акцент сделан не на воспроизведении всех движений кисти, а на реализации минимального набора функциональных хватов при ограниченном числе приводов.

Аппаратная часть. Регистрация электромиографических сигналов выполняется с помощью двух поверхностных ЭМГ-модулей, размещаемых на мышцах предплечья. Управляющим блоком выбран микроконтроллер Arduino Nano. Для управления приводами используется драйвер DRV8833 и два коллекторных DC-мотора.

На этапе стендовой проверки питание системы организовано отдельно. Аналоговая часть регистрации ЭМГ-сигнала питается от двуполярного источника, микроконтроллер – от USB, а исполнительные механизмы – от отдельного источника питания приводов. Такое разделение упрощает отладку и снижает влияние помех от двигателей на регистрацию биосигналов.

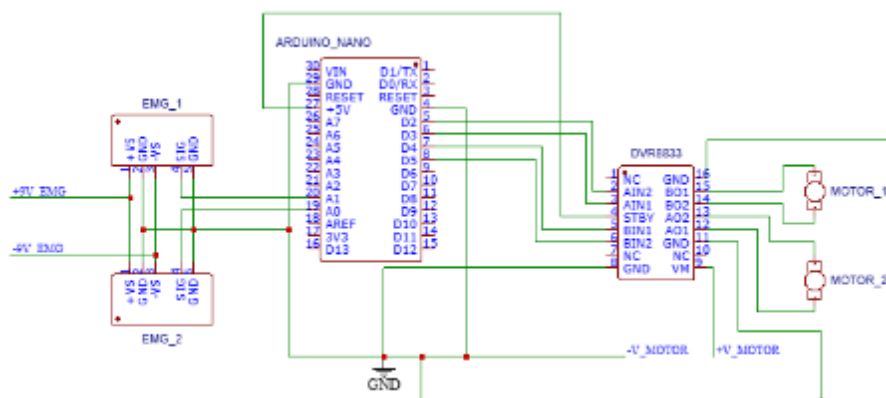


Рис. 3. Упрощённая схема аппаратной части прототипа миоэлектрического протеза кисти.

Обработка сигналов. Для формирования управляющей команды ЭМГ-сигнал анализируется во временных окнах. В работе используется окно длительностью 200 мс с шагом 100 мс. Для каждого окна рассчитываются признаки временной области: среднее абсолютное значение сигнала MAV и среднеквадратичное значение RMS. Эти признаки позволяют оценить уровень мышечной активности и использовать его для дальнейшего распознавания состояния.

Для более устойчивого различения состояний в дальнейшем используется двухканальная схема регистрации ЭМГ. Она позволяет анализировать не только общий уровень мышечной активности, но и различие между паттернами, соответствующими силовому и точечному хвату.

Функциональность прототипа

В прототипе рассматриваются три управляющих состояния: покой, силовой хват и точечный хват. В состоянии покоя исполнительные механизмы не должны активироваться. При распознавании команды силового хвата должен включаться привод, отвечающий за сгибание группы пальцев. При распознавании команды точечного хвата должен активироваться привод, обеспечивающий движение большого и указательного пальцев.

Такое разделение выбрано как минимальный функциональный набор для демонстрационного прототипа. Силовой хват может использоваться для удержания более крупных предметов, а точечный хват – для взаимодействия с небольшими объектами. Для текущего этапа такой набор движений является компромиссом между функциональностью и сложностью механической реализации.

Экспериментальная часть

Проверка прототипа выполнялась поэтапно. На первом этапе оценивалась регистрация ЭМГ-сигнала в состоянии покоя и при мышечном напряжении. На втором этапе проверялась работа микроконтроллерного блока и драйвера двигателей. На третьем этапе оценивалась возможность независимого управления двумя приводными каналами.

Такой порядок испытаний выбран для разделения возможных источников ошибок. Отдельная проверка ЭМГ-модулей позволяет оценить качество регистрации биосигнала, проверка драйвера и моторов – работоспособность исполнительской части, а совместная проверка узлов – готовность системы к дальнейшей интеграции.

По результатам стендовой проверки подтверждена работоспособность двух ЭМГ-модулей, микроконтроллерного блока, драйвера DRV8833 и двух DC-моторов. Также проверена возможность независимого включения приводов, что важно для разделения команд силового и точечного хвата.

Анализ полученных результатов

На этапе предварительной проверки было показано, что регистрируемый ЭМГ-сигнал заметно изменяется при мышечной активации. Это подтверждает возможность использования поверхностной ЭМГ для формирования управляющей команды в демонстрационном прототипе.

Основными факторами, влияющими на устойчивость работы системы, являются расположение электродов, качество контакта с кожей, уровень мышечной активности и помехи от исполнительных механизмов. Поэтому при дальнейшей сборке прототипа особое внимание должно быть уделено фиксации электродов, разделению цепей питания и настройке алгоритма распознавания.

Заключение

В работе сформирована структура прототипа персонализированного миоэлектрического протеза кисти. Показано, что 3D-сканирование контралатеральной конечности может использоваться как основа для построения индивидуальной внешней геометрии корпуса, а поверхностный ЭМГ-сигнал – как источник управляющей информации.

Проведённая проверка подтвердила работоспособность двух ЭМГ-модулей, микроконтроллерного блока, драйвера двигателей и двух независимых приводных каналов. Предложенный подход сочетает персонализацию конструкции, аддитивное изготовление и миоэлектрическое управление. Следующим этапом является интеграция механической части протеза и проверка связки "ЭМГ-сигнал – управляющая команда – движение привода" для базовых типов хвата.

Список литературы

1. World Health Organization. WHO standards for prosthetics and orthotics. Part 1: Standards. Geneva: World Health Organization, 2017. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241512480> (дата обращения: 29.04.2026).

2. Geethanjali P. Myoelectric control of prosthetic hands: state-of-the-art review // Medical Devices: Evidence and Research. 2016. Vol. 9. P. 247–255. DOI: 10.2147/MDER.S91102. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4968852/> (дата обращения: 27.04.2026).
3. Hudgins B., Parker P., Scott R.N. A new strategy for multifunction myoelectric control // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1993. Vol. 40, № 1. P. 82–94. DOI: 10.1109/10.204774. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8468080/> (дата обращения: 25.04.2026).
4. Wang Y., Tan Q., Pu F., Boone D., Zhang M. A Review of the Application of Additive Manufacturing in Prosthetic and Orthotic Clinics from a Biomechanical Perspective // Engineering. 2020. Vol. 6, № 11. P. 1258–1266. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.019. URL: <https://www.engineering.org.cn/engi/EN/10.1016/j.eng.2020.07.019> (дата обращения: 27.04.2026).
5. Silva R., Silva B., Fernandes C., Morouço P., Alves N., Veloso A. A Review on 3D Scanners Studies for Producing Customized Orthoses // Sensors. 2024. Vol. 24, № 5. Article 1373. DOI: 10.3390/s24051373. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1373> (дата обращения: 28.04.2026).
6. Lee S.P., Mitchell C., Repayo K., Tillitt M., Weber C., Chien L.C., Doerger C. Patient Engagement in Cosmetic Designing of Prostheses: Current Practice and Potential Outcome Benefits // Prosthetics and Orthotics International. 2022. Vol. 46, № 4. P. E335–E340. DOI: 10.1097/PXR.000000000000113. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35344529/> (дата обращения: 23.04.2026).

ПЕРФУЗИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СТАТИЧЕСКАЯ КОНСЕРВАЦИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

ПОТАНИН А.Н., КРАПИВНИЦКАЯ М.А., МИТЯГИН А.М.

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

Аннотация. Трансплантация легких остается единственным радикальным методом лечения терминальной дыхательной недостаточности, однако критический дефицит донорских органов и ограниченное время их жизнеспособности существенно снижают эффективность. В обзоре проведен сравнительный анализ двух основных технологий консервации донорских легких: статической холодовой консервации (СХК) и нормотермической экстракорпоральной перфузии (EVLP). Рассмотрены методологические различия, клинические исходы, экономические и логистические аспекты. Особое внимание уделено новым стратегиям, включая оптимизацию температуры хранения (10°C) и циклическое чередование холодового хранения с EVLP, позволяющее продлить срок сохранения до 3 суток.

Ключевые слова: трансплантация легких, статическая консервация, экстракорпоральная перфузия легких, нормотермическая перфузия, ишемически-реперфузионное повреждение

Введение

Несмотря на значительные достижения в области хирургии и иммуносупрессии, успех трансплантации легких ограничивается двумя основными факторами: дефицитом донорских органов и высокой частотой их браковки (до 80% на этапе забора) [1]. Ключевым звеном, определяющим исход трансплантации, является качество консервации органа в период между эксплантацией и реперфузией. Традиционно «золотым стандартом» служит статическая холодовая консервация (СХК) при 4°C, однако допустимое время ишемии при таком режиме не превышает 6–8 часов [2]. За последние годы разработаны альтернативные подходы: нормотермическая перфузия *ex vivo* (EVLP) и модифицированная статическая консервация при более высокой температуре (10°C). Настоящий обзор посвящен сравнительному анализу эффективности этих методов.

Стандарты и ограничения статической холодовой консервации

Методология СХК заключается в промывании легких консервирующим раствором с последующим хранением в гипотермических условиях. Низкая температура замедляет

клеточный метаболизм, снижает потребность в кислороде и подавляет активность протеаз [1, 2]. Однако даже при 4°C неизбежно развивается ишемически-реперфузионное повреждение [3]. Клинические данные свидетельствуют, что при хранении более 8 часов риск первичной дисфункции трансплантата (ПДТ) возрастает многократно. СХК отличается простотой, низкой стоимостью (500 000 – 2 000 000 руб. с учетом оборудования) и минимальными требованиями к персоналу, однако процент отказа от пересадки достигает 30%, а годовичная выживаемость реципиентов составляет 65-80% [4].

Нормотермическая экстракорпоральная перфузия легких

Технология EVLP представляет собой замкнутый перфузионный контур с оксигенатором, центробежным насосом и системой вентиляции [5, 6]. Легкие перфузируются ацеллюлярным или обогащенным эритроцитами раствором при 37°C, что позволяет поддерживать физиологический метаболизм, проводить функциональную оценку и даже терапевтические вмешательства, такие как введение антибиотиков, противовоспалительных средств и генная терапия. [1, 7]. Процедура включает защитную вентиляцию (дыхательный объем 7 мл/кг, ПДКВ 5 см вод. ст., частота 7–10 в минуту) и постепенное увеличение перфузионного потока до 40% от расчетного сердечного выброса донора [2, 6].

В клинических испытаниях показано, что EVLP позволяет успешно трансплантировать легкие, изначально считавшиеся маргинальными ($PaO_2/FiO_2 < 300$ мм рт. ст.), с годовичной выживаемостью до 85% и частотой ПДТ 2-3 степени около 15% [1, 6]. Основными недостатками остаются высокая стоимость (от 25 млн руб.), сложность оборудования и необходимость специально обученного персонала [4].

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов консервации донорских легких

Параметр	Статическая холодовая консервация при 4°C	Нормотермическая EVLP при 37°C
Методология	Хранение в консервирующем растворе на льду	Перфузия в замкнутом контуре с оксигенацией
Время хранения	6-8 часов	4-6 часов непрерывно, циклически до 72 часов
Годичная выживаемость реципиентов	65-80%	>90%
Процент отказа от пересадки	30%	10-15%
Риск ишемического повреждения	Высокий	Низкий (благодаря восстановлению метаболизма)
Стоимость оборудования	0,5-2 млн руб.	От 25 млн руб.
Логистика	Портативный холодильник	Стационарная система
Процент осложнений (ПДТ, бронхолит)	25%	10-15%

Как следует из таблицы 1, EVLP превосходит СХК по большинству функциональных показателей, но уступает в экономической доступности и простоте.

Новые направления: оптимизация температуры и циклические протоколы

Недавние исследования показали, что повышение температуры статического хранения с 4°C до 10°C позволяет увеличить безопасный период консервации до 24-36 часов за счет

сохранения митохондриального здоровья и стабильности мембран [3]. Авторы работы на модели свиньи установили, что при 10°C, в отличие от 4°C, лучше поддерживается дыхательная активность митохондрий, снижается накопление активных форм кислорода и уменьшается экспрессия провоспалительных цитокинов. Однако даже при 10°C непрерывное статическое хранение в течение 72 часов приводит к нежизнеспособности органа – при попытке трансплантации таких легких развивался массивный отек, и животные погибали в течение первого часа после реперфузии [3].

Попытка использовать длительную непрерывную нормотермическую перфузию (более 24 ч) также не увенчалась успехом из-за прогрессирующего отека паренхимы и накопления биопродуктов воспаления [3]. В связи с этим была предложена гибридная стратегия: чередование длительных периодов холодового хранения (20 ч при 10°C) с короткими сеансами EVLP (по 4 ч). Ключевым механизмом, объясняющим эффективность циклического протокола, служит метаболическая «реанимация» во время коротких периодов нормотермии, кроме того, после каждого сеанса EVLP в ткани легкого восстанавливаются уровни глюкозы, сукцината и N-ацетиласпартата — метаболитов центрального углеродного цикла.

Практическая значимость циклических протоколов выходит за рамки простого продления времени хранения: возможность сохранять легкие в течение нескольких дней открывает путь к созданию «банков органов», позволяет проводить подбор реципиента в плановом порядке, а также выполнять сложные многодневные терапевтические манипуляции, например, генную терапию или обработку стволовыми клетками. [1, 3]. В то же время для внедрения этой технологии в клинику требуется решение ряда задач: стандартизация состава перфузата на несколько циклов, предотвращение микробной контаминации, снижение стоимости отечественных перфузионных систем и расходных материалов [4, 7].

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показывает, что нормотермическая EVLP существенно превосходит статическую холодовую консервацию по качеству сохранения донорских легких, снижению частоты ПДТ и увеличению процента успешных трансплантаций, однако высокая стоимость и сложность ограничивают её широкое внедрение. Оптимальным компромиссом может стать использование модифицированной статической консервации при 10°C для стандартных случаев и циклических протоколов «холод–тепло» для продления сроков хранения и реабилитации субоптимальных органов. Дальнейшие исследования в области метаболической поддержки и разработка отечественных перфузионных систем позволят повысить доступность этой передовой технологии.

Список литературы

1. Tatham K.C., O'Dea K.P., Wakabayashi K., Marczin N., Takata M. The role of ex vivo lung perfusion in lung transplantation. *Journal of the Intensive Care Society*. 2015; 16(1): 58-63.
2. Cypel M., Keshavjee S. Ex vivo lung perfusion. *Operative Techniques in Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2014; 19(4): 433-442.
3. Ali A., Nykanen A.I., Beroncal E., Brambate E., Mariscal A., Michaelsen V. Successful 3-day lung preservation using a cyclic normothermic ex vivo lung perfusion strategy. *EBioMedicine*. 2022; 84: 104-210.
4. Готье С.В., Пашков И.В., Богданов В.К., Олешкевич Д.О., Бондаренко Д.М., Можейко Н.П., Буненков Н.С., Грудинин Н.В. Ex vivo перфузия донорских легких с использованием разработанного раствора с последующей ортотопической левосторонней трансплантацией легкого (экспериментальное исследование). *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2023; 25(2): 158-166.

5. Steen S., Ingemansson R., Eriksson L. First human transplantation of a nonacceptable donor lung after reconditioning ex vivo. The Annals of Thoracic Surgery. 2007; 83(6): 2191-2194.
6. Cypel M., Yeung J.C., Liu M. Normothermic ex vivo lung perfusion in clinical lung transplantation. New England Journal of Medicine. 2011; 364(15): 1431-1440.
7. Готье С.В., Цирульников О.М., Пашков И.В., Олешкевич Д.О., Филатов И.А., Богданов В.К., Бондаренко Д.М., Можейко Н.П., Карпов А.А., Буненков Н.С., Грудинин Н.В. Нормотермическая ex vivo перфузия изолированных легких в эксперименте с использованием отечественного перфузионного аппаратного комплекса. Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2022; 24(2): 94-101.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЗВУЧИВАНИЯ ПРУТКОВ ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ.

АШИХМИН Д. И.¹, ПЕТРОВ Г. А.²

^{1,2}*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург 197022, Россия.*

Аннотация. Рассмотрено влияние параметров аппаратных и программных средств на скорость сканирования при реализации контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях. Определены требования к оборудованию для реализации метода на компактной платформе.

Ключевые слова: *производительность, зеркально-теневой метод на многократных отражениях, сканирование, аппаратно-программный комплекс*

Введение

В дефектоскопии широкое распространение приобретает неразрушающий контроль с использованием электромагнитно-акустических преобразователей. Одним из применений ЭМА преобразователей является контроль прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях. Акустический импульс возбуждается на поверхности тела прутка, распространяется вглубь и многократно отражается от его противоположной поверхности. Регистрация импульса производится на поверхности прутка тем же преобразователем. Наличие включений, отклонение формы сечения объекта контроля и другие особенности тела прутка влияют на форму огибающей зарегистрированной серии импульсов (рисунок 1). Результатом измерения являются амплитуда и время прихода отражённых импульсов, многократно прошедших через контролируемую часть прутка. При отсутствии дефектов и круглой форме сечения контролируемого объекта импульсы создают чёткую затухающую серию. При наличии включений появляются посторонние импульсы, при нарушении формы сечения серия импульсов имеет модуляцию по амплитуде и в некоторых случаях импульсы раздваиваются. [1]

Зеркально-теневой метод на многократных отражениях реализован в лабораторной версии дефектоскопа ДЭМА, где получение и обработка данных производится компьютерным блоком с установленным в него платой АЦП. Система имеет две конфигурации системы Intel Core i5 3470 3.2 GHz/ASUS P8B75-M/8 Гб DDR3/HDD - 2 Тб/Win10 с платами АЦП: ЛА-н10м8РСІ-100, ЛАн10-12РСІ-У. Регистрация эхограммы проводится на частотах дискретизации АЦП – 100 МГц, 125 МГц и на более низких, частотах меньше частоты АЦВ в 2^н раз. Программное обеспечение ПРИНЦ IX Fast (ПО)

позволяет настраивать длину временной оси и частоту регистрации сигналов, а также имеет внутренний интерфейс измерения временных затрат, представленный на рисунке 2. Основной задачей ПО является расчет информативных параметров, построение эхограммы на основе зарегистрированных данных. Пример эхограммы для прутка диаметром 10 мм представлен на рисунке 1. В представленной эхограмме, длинна временной реализации составляет 0,2 мс. На эхограмме представлена серия импульсов, включая зондирующий и донные импульсы (часть донных импульсов скрыто в мёртвой зоне, за зондирующим импульсом). Целевые параметры рассчитываются на основании семейства амплитуд донных импульсов. Для увеличения отношения полезного сигнала к шуму используется процедура усреднения, при которой за счет автоматической синхронизации момента начала измерения с появлением зондирующего импульса, серии импульсов многократно усредняются.[2 - 4]

Для оценки временных затрат информационной системы отображаются несколько параметров, ключевым из которых, при исследовании, является параметр «Измерение» – время, затраченное компьютером на выполнение задачи в рамках регистрации данных и расчета целевых параметров, без учёта времени накладных расходов, вызванных работой компьютерной системы. Параметр «Кадр» – время затраченное компьютером на выполнение задачи совместно с другими процессами, выполняемыми системой.

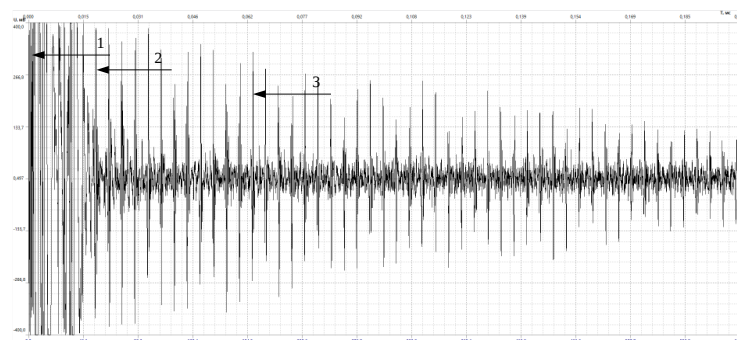


Рис. 1. Зарегистрированный сигнал в виде эхограммы, усреднение 32

1 – зондирующий импульс; 2 – 6-ый донный импульс; 3 – 18-ый донный импульс

Объём регистрируемых данных G (байт) определяется частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя f_d (Гц), его разрядностью в байтах m и длиной временной оси t_r . Длина временной оси t_r – длительность сигнала, регистрируемого компьютером при однократном измерении (длина эхограммы), X – усреднение. [5]

$$G = f_d \cdot m \cdot t_r \cdot X.$$

Параметр	Значение	Нижний предел	Верхний предел	
☒ Кадр (мс)	31,0975	0,0000	0,0000	Выше
☒ Измерение (мс)	29,5569	0,0000	0,0000	Выше
☒ Минимум	-0,0981	0,0000	0,0000	Выше
☒ Максимум	0,0748	0,0000	0,0000	Выше
☒ Матожидание	-2,9512	0,0000	0,0000	Выше
☒ Дисперсия	585,2792	0,0000	0,0000	Выше

Рис. 2. Интерфейс отображения временных характеристик измерения программы ПРИНЦ IX Fast

Оценка влияния параметров эксперимента осложнена необходимостью обеспечить непрерывную регистрацию сигналов, при поступательном движении прутка сквозь датчик (сканирования). При этом, рабочая зона датчика (длина объекта контроля, прозвучиваемая за один цикл измерения) составляет 10 мм. Таким образом, при усреднении равном 16, для обеспечения производительности контроля в 6 м/мин необходимо обеспечить, частоту повторения зондирующих импульсов 160 Гц.

Эксперимент и результаты

Вследствие необходимости усреднения, актуальной задачей является выбор длины временной реализации эхограммы, коэффициента усреднения и частоты следования зондирующих импульсов. Оптимально подобранные значения позволяют уменьшить затраты на контроль за счёт более высокой скорости сканирования.

Расчет статистических характеристик и формирование целевых параметров отображаемых на экране, производится в отдельном потоке и при проведении эксперимента не учитывались. Рассматриваемое время, затраченное компьютером для формирования эхограммы, учитывает время многократной регистрации сигнала, затраты на пересылку полученных данных, их последующую обработку и консолидацию. Другие параметры, влияющие на время кадра, были отключены программно.

Обработка сигнала включает: фильтрацию, выпрямление, потенцирование, отсечение шума, нормирование, построение огибающей, расчет целевых параметров. Базовую часть времени составляют непосредственно измерение, пересылка результатов, их усреднение. На рисунке 3 представлены временные затраты при использовании разных АЦП на 2-х частотах дискретизации. Для исключения влияния времени ожидания зондирующего импульса, результаты получены без синхронизации регистрирующей системы с зондирующим импульсом. Число точек временной оси задавалось временем регистрации эхограммы.

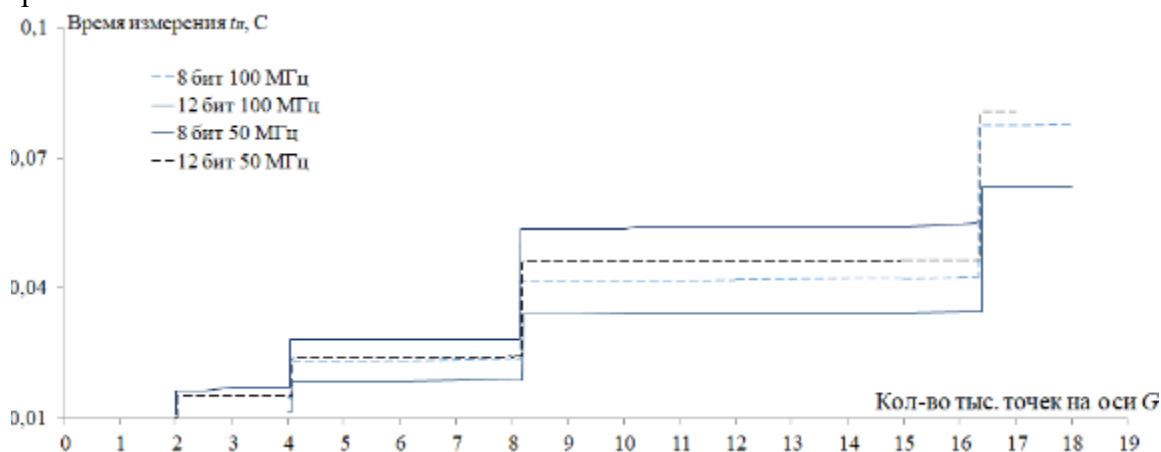


Рис. 3. Временные затраты в зависимости от частоты регистрации, при разных усреднениях

Ступенчатое изменение времени измерения вызвано фиксированным набором размеров буфера платы АЦП, при его автоматическом определении в соответствии с объёмом регистрируемых данных. Необходимо, по возможности, ограничивать длину временной оси, не допуская неоправданного перехода на следующий больший объём буфера. При разрядности платы АЦП больше чем один байт, в пересылке данных участвует два байта.

По результатам получена эмпирическая формула, согласно которой время измерения t_n определяется частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя f_d , разрешением

аналого-цифрового преобразователя в байтах m , числом усредняемых измерений n и коэффициентами a, b . Переменная x вычисляется как логарифм, по основанию 2 от объёма регистрируемых данных G . Значения коэффициентов a, b для разных конфигураций системы и настроек приведены в таблице 1.

$$t_n = f_d \cdot m \cdot n \cdot x^{(a \cdot x + b)}. \quad (2)$$

Таблица 1

Время регистрации кадра в зависимости от частоты дискретизации и длины временной оси при усреднении $n=32$

Частота дискретизации f_d , МГц	50		100	
Разрешение аналого-цифрового преобразователя m , байт	1	2	1	2
Значение коэффициента b	19	19,5	18	18,35
Значение коэффициента a	0,5		0,35	

Конфигурация дефектоскопа, на основе компьютера, имеет ряд ограничений, таких как затруднения при его использовании за пределами лаборатории (на производствах и действующих объектах). Процесс обработки данных на компьютере может приостанавливаться из-за многозадачности операционной системы. Для нивелирования перечисленных выше ограничений в качестве аппарата регистрации и математической обработки результатов компьютерный блок необходимо заменить на более компактную и узкозадачную систему. В качестве технологического решения, удовлетворяющего заданным требованиям, может выступать схема на базе ПЛИС. ПЛИС должна обеспечивать работу с 8-и разрядным АЦП на скорости не меньше 100 МГц, обладать возможностью регистрировать эхограммы длиной до 0,5 мс и производить их усреднение непосредственно при измерении.

Вывод:

Схема рассматриваемой установки дефектоскопа, реализующая контроль зеркально-теневым методом на многократных отражениях имеет ряд особенностей в работе, осложняющих выбор настроек для достижения высоких скоростей сканирования. Расчёт времени сканирования возможен с использованием выведенных формул. Для достижения высоких скоростей сканирования необходимо заменить в установке блок компьютера на регистрационно-вычислительный узел на основе ПЛИС. ПЛИС должна обеспечивать работу с 8-и разрядным АЦП на скорости не меньше 100 МГц, обладать возможностью регистрировать эхограммы длиной до 0,5 мс и производить их усреднение непосредственно при измерении.

Список литературы

1. Муравьева, О. В. Закономерности фокусировки поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя поперечных волн / О. В. Муравьева, А. Ф. Брестер, А. Л. Владыкин // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 9(303). – С. 27-41. – DOI 10.14489/td.2023.09.pp.027-041. – EDN OYXOJ.
2. Стрижак, В. А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 565-571. – DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571. – EDN YTPNDZ.
3. Муравьев, В. В. Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 71-75. – EDN WAXWNJ.

4. Муравьев, В. В. Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 71-75. – EDN WAXWNJ.
5. Стрижак, В. А. Оценка временных затрат программного обеспечения при прозвучивании прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, Д. И. Ашихмин // «Приборостроение в XXI веке – 2023, Интеграция науки, образования и производства»: сб. мат. XIX Всерос. Науч.-техн. Конф. (Ижевск, 29 нояб. – 1 дек. 2023 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2024.

ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО АДАПТИВНОЙ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ

СУЛИМАН М.

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

Аннотация. Рассматривается задача снижения максимальной погрешности аппроксимации в многоканальных адаптивных телеизмерительных системах (АТИС) при переменной загрузке. Показано, что при циклическом опросе каналов рост коэффициента загрузки ρ приводит к увеличению времени ожидания в очереди и неограниченному росту дополнительной погрешности. Предложена структура передающего устройства с контуром обратной связи, динамически корректирующим уставку ε_d . Разработан трёхуровневый алгоритм управления ($k \in \{0,5; 1,0; 2,0\}$), снижающий максимальную погрешность на 64,9 % при $\rho = 0,9$.

Ключевые слова: адаптивная телеизмерительная система, погрешность аппроксимации, обратная связь, коэффициент загрузки, адаптивная дискретизация, теория массового обслуживания.

1. Введение

Адаптивные телеизмерительные системы (АТИС) широко применяются для контроля удалённых объектов благодаря сокращению избыточности данных. Однако в многоканальных АТИС при циклическом опросе и фиксированной уставке ε_d возникает рост дополнительной погрешности аппроксимации из-за очередей заявок. Особенно остро эта проблема проявляется при коэффициенте загрузки ρ , близком к единице.

Цель работы – разработка передающего устройства с обратной связью, динамически изменяющего уставку для минимизации максимальной погрешности.

2. Структура передающего устройства и принцип действия блока обратной связи

Структурная схема передающей части АТИС с адаптивной дискретизацией приведена на рис. 1. Принцип работы схемы состоит в следующем. Адаптивный временной дискретизатор (АВД) в каждом канале непрерывно сравнивает погрешность аппроксимации с порогом ε_d и при его достижении формирует запрос. Генератор тактовых импульсов (ГТИ) совместно со схемой запуска (СЗ) и распределителем (Р) обеспечивают циклический опрос каналов. При обнаружении запроса схема совпадения (ИС) открывает ключ (К), подключая датчик (Д) к аналого-цифровому преобразователю (АЦП); собирательная схема (ИСИ) одновременно блокирует опрос до завершения преобразования. Блок считывания (БС) преобразует код параметра и адрес канала из параллельного формата в последовательный и передаёт их в линию связи соответственно. По завершении передачи схема совпадения (ИС1) формирует сигнал сброса АВД исключительно активного канала, после чего распределитель возобновляет опрос.

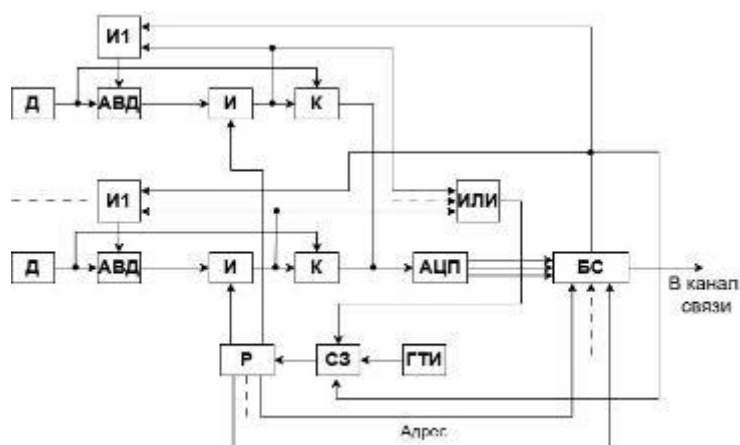


Рис. 1. Структурная схема передающей части АТИС с адаптивной дискретизацией

Одним из главных недостатков данной схемы является возникновение очереди заявок при одновременном срабатывании нескольких АВД. Канал, подавший заявку, вынужден ждать, пока распределитель обслужит предыдущие каналы. За это время входной сигнал изменяется, что порождает дополнительную погрешность аппроксимации ε_m . При высокой загрузке ρ (близкой к 1) очередь и ε_m становятся недопустимо большими – система без обратной связи теряет точность[3][5].

Для устранения этого недостатка в схему добавляется блок обратной связи (БОС) (рис. 2). БОС объединяет в себе две функции: определение числа активных каналов и изменение уставки. Он может быть реализован как цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) – например, резистивный сумматор с триггерами на входах. Выходное напряжение такого сумматора прямо пропорционально количеству сработавших АВД (например, 1 В на один активный канал, 8 В – на восемь). Это напряжение управляет опорным напряжением компараторов АВД, то есть изменяет уставку ε_d .

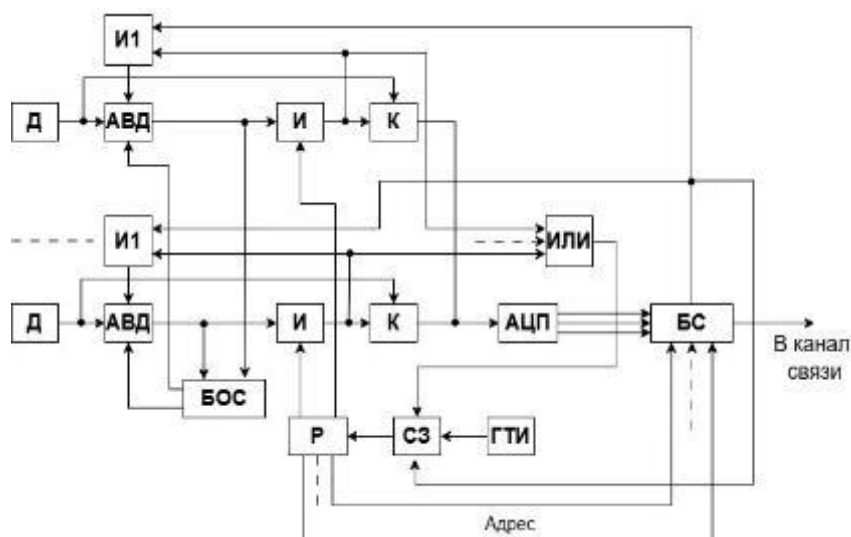


Рис. 2. Структурная схема передающей части АТИС с адаптивной дискретизацией и обратной связью по погрешности аппроксимации

При увеличении числа активных каналов уставка автоматически повышается ($k > 1$), что снижает интенсивность потока заявок и уменьшает очередь. При малой загрузке уставка

понижается ($k < 1$), повышая точность. По завершении цикла опроса триггеры сбрасываются, и процесс повторяется.

3. Максимальная погрешность и результаты моделирования

Рассмотрим передающее устройство как систему массового обслуживания М/М/1 с ожиданием [4]. Коэффициент загрузки $\rho = \lambda/\mu$, где λ — интенсивность входного потока заявок от АВД, μ — пропускная способность системы. Максимальная погрешность аппроксимации [1]:

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_d + M[\varepsilon_m] + k_p \sigma[\varepsilon_m], \quad (1)$$

где ε_d — допустимая погрешность (уставка); $M[\varepsilon_m]$ — математическое ожидание дополнительной погрешности; $\sigma[\varepsilon_m]$ — среднеквадратическое отклонение дополнительной погрешности; k_p — коэффициент, зависящий от закона распределения погрешности аппроксимации и вероятности появления максимальной погрешности (например, при вероятности появления максимальной погрешности 0,9973: $k_p = 3$ (правило 3σ)).

Для $n = 0$ (экстраполяция нулевого порядка) при экспоненциальном законе обслуживания [2]:

$$M[\varepsilon_m]/\varepsilon_d = \rho^2/N(1-\rho), \quad (2)$$

$$\sigma[\varepsilon_m]/\varepsilon_d = [\rho/N(1-\rho)] \sqrt{(2\rho(\sigma_{\text{пр}}^2 + 1) - \rho^2)}, \quad (3)$$

N — число измерительных каналов; $\sigma_{\text{пр}}^2$ — нормированная дисперсия модуля максимума первой производной входного сигнала, характеризующая скорость его изменения; принято $\sigma_{\text{пр}}^2 = 0,56$ для нормального распределения модуля [1]; $(1-\rho)$ — свободная ёмкость системы; при $\rho \rightarrow 1$ погрешность неограниченно возрастает.

При $N = 8$ и $\rho = 0,9$ по формулам (1)–(3): $\varepsilon_{\max}/\varepsilon_d = 6,783$. Этот результат недопустим для большинства практических применений. Физическая причина — знаменатель $(1 - \rho)$ стремится к нулю при $\rho \rightarrow 1$, что приводит к неограниченному росту $M[\varepsilon_m]$ и $\sigma[\varepsilon_m]$. Для устранения данного недостатка предлагается ввести контур обратной связи, динамически уменьшающий загрузку системы.

При изменении уставки в k раз новый коэффициент загрузки ρ_2 при уставке $k \cdot \varepsilon_d$ определяется из [1]: при $n = 0$: $\rho_2 = \rho_1/k$, где ρ_1 — коэффициент загрузки при исходной уставке ε_d . На основании моделирования в MATLAB разработан трёхуровневый алгоритм управления уставкой:

$$\begin{aligned} k &= 0,5 \text{ при } \rho_{\text{тек}} < 0,280; \\ k &= 1,0 \text{ при } 0,280 \leq \rho_{\text{тек}} \leq 0,685; \\ k &= 2,0 \text{ при } \rho_{\text{тек}} > 0,685. \end{aligned} \quad (4)$$

Пороговые значения $\rho_1^* = 0,280$ и $\rho_2^* = 0,685$ определены как точки пересечения кривых $\varepsilon_{\max}/\varepsilon_d$ для соседних уровней уставки (рис. 3): в этих точках переключение k не приводит к скачку погрешности. Моделирование выполнено при $N = 8$, $k_p = 3$, $\sigma_{\text{пр}}^2 = 0,56$.

В критическом режиме $\rho = 0,9$ погрешность снизилась с $6,783 \cdot \varepsilon_d$ до $2,382 \cdot \varepsilon_d$ — более чем в 2,8 раза (64,9 %).

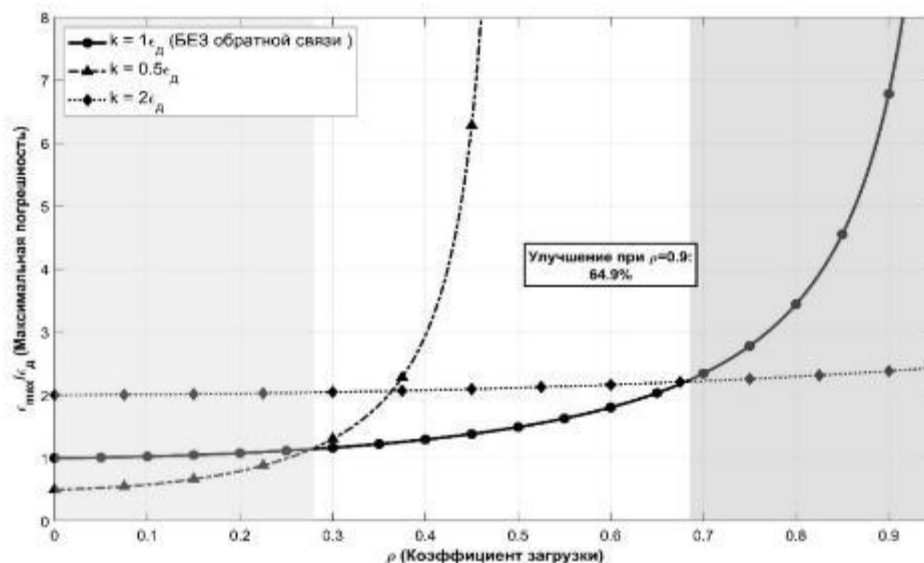


Рис. 3. Зависимость $\epsilon_{\max}/\epsilon_0$ от ρ для трёхуровневой системы ($N = 8$, $k\rho = 3$, $\sigma^2 n\rho = 0,56$)

Заключение

1. Предложена структура передающего устройства АТИС с контуром обратной связи по погрешности аппроксимации. Блок БОС динамически корректирует уставку ϵ_d в зависимости от коэффициента загрузки ρ , предотвращая неограниченный рост дополнительной погрешности при переменной нагрузке.

2. Разработан трёхуровневый алгоритм управления уставкой ($k \in \{0,5; 1,0; 2,0\}$) с порогами $\rho_1^* = 0,280$ и $\rho_2^* = 0,685$. Показано снижение $\epsilon_{\max}$ на 64,9 % при $\rho = 0,9$. Ограничения модели: $n = 0$ и однородные каналы ($\lambda_i = \lambda_0$).

Список литературы

1. Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Долинов С.Н., Душин В.К., Мартяшин А.И., Фремке А.В., Химичев В.А. Адаптивные телеизмерительные системы / под ред. А.В. Фремке. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 248 с.
2. Алексеев В.В., Антонюк Е.М., Варшавский И.Е. Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем автоматического контроля // Известия вузов России. Радиоэлектроника. — 2020. — Т. 23, № 6. — С. 84–99. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-84-99.
3. Антонюк Е.М. Адаптивные измерительные системы и системы автоматического контроля со сжатием данных: дис. д-ра техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — СПб., 2003.
4. Риордан Д. Вероятностные системы обслуживания. — М.: Связь, 1966. — 256 с.
5. Антонюк Е.М., Варшавский И.Е., Антонюк П.Е. Информационно-измерительные системы. — М.: Высшая школа, 2018. — 512 с.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИФРОВОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА

ЛАРИЧЕВ Р.А.¹, БОЛИЛЫЙ А.²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им В. И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Благодаря высокой стабильности и точности измерений, цифровые автоколлиматоры широко распространены в высокоточном приборостроении. В составе сложных систем, автоколлиматоры используются для высокоточного углового позиционирования, определения карт локальных угловых отклонений протяженных поверхностей, а также для мониторинга деформаций объектов. В таких системах особенно важно стабилизировать выходную характеристику

автоколлиматора, которая искажается со временем. Экспериментальные данные демонстрируют многочасовой рост температуры матричного фотоприемника в составе автоколлиматора АК-25, а также корреляцию зависимости его показаний от температуры. В данной работе представлена система охлаждения автоколлиматора на основе элемента Пельтье, позволяющая стабилизировать показания автоколлиматора в режиме долгосрочных измерений.

Ключевые слова: Автоколлиматор, система охлаждения, Эффект Пельтье

Автоколлиматор – это высокоточный оптоэлектронный углоизмерительный прибор, использующий метод автоколлимации для получения сведений об угловом отклонении отражающей поверхности относительно его оптической оси. Угловое положение отражающей поверхности определяется по линейному смещению [2,3] автоколлимационной марки в соответствии с выражением: $\alpha_x = x / 2F$; $\alpha_y = y / 2F$, где x, y – линейное смещение автоколлимационной марки в системе координат матричного фотоприемника. Современные автоколлиматоры имеют абсолютную погрешность определения углового положения порядка 0.1 угловой секунды. Благодаря высокой точности и стабильности измерений, автоколлиматоры нашли применение в высокоточном приборостроении. В составе комплексных измерительных систем, автоколлиматоры используются для высокоточного позиционирования, для мониторинга деформаций объекта [1] и др. В таких сферах применения, особенно важной задачей – является стабилизация выходной характеристики автоколлиматора. Известна проблема медленного искажения показаний (дрейф) автоколлиматора при долгосрочных, многочасовых измерениях. В системах мониторинга, измерения могут проводиться на протяжении многих часов, что приводит к возникновению нарастающей ошибки автоколлиматора. Для анализа факторов влияния на дрейф погрешности цифрового автоколлиматора АК-25 были сняты экспериментальные данные. Лабораторная установка состоит из двух плоских зеркал (1) и автоколлиматора АК-25 (2).

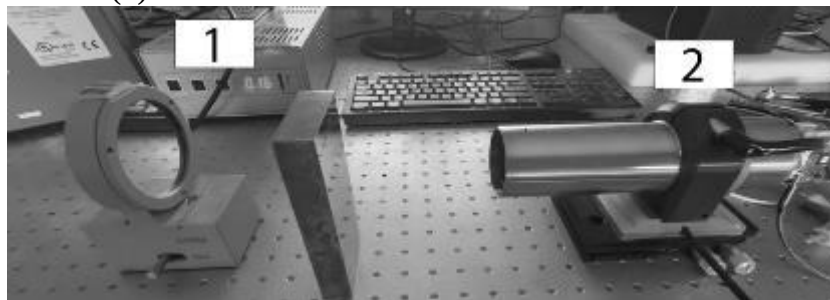


Рис. 1. Лабораторная установка

Автоколлиматор состоит из матричного фотоприемника и оптических элементов. Корпус автоколлиматора АК-25 состоит из нержавеющей стали. Значительное повышение температуры возможно только на матричном фотоприемнике, который подключен к сети питания 5В USB 3.0 ПК. С помощью инфракрасного тепловизора была проанализирована задняя сторона матричного фотоприемника, где располагаются элементы электроники. Самой горячей точкой является микросхема, расположенная асимметрично относительно центра матрицы. Для анализа пространственно неравномерного расширения пикселей матрицы используются два зеркала (1), которые делят автоколлимационный пучок на два независимых, угол между которыми составляет около 500 угловых секунд. Для уменьшения влияния оптических факторов на результат измерений, минимизирована разница интенсивностей этих пучков с помощью сравнения пиков значений интенсивности на

графике распределения в сечении по оси x матричного фотоприемника. Контроль интенсивности пучков осуществляется за счет перемещения зеркал.

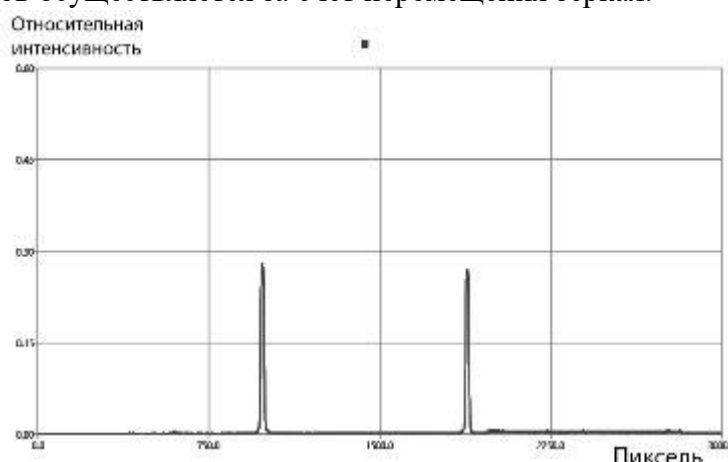


Рис. 2. График распределения интенсивности автоколлимационных марок в сечении по оси x

Экспериментальные данные

С помощью лабораторной установки получены экспериментальные данные об угловом положении (рис. 3) двух автоколлимационных марок при неподвижных зеркалах. Измерения производились на протяжении 30-ти минут с усреднением по 50 измерениям. Частота усредненных измерений составляет порядка 2 Гц.

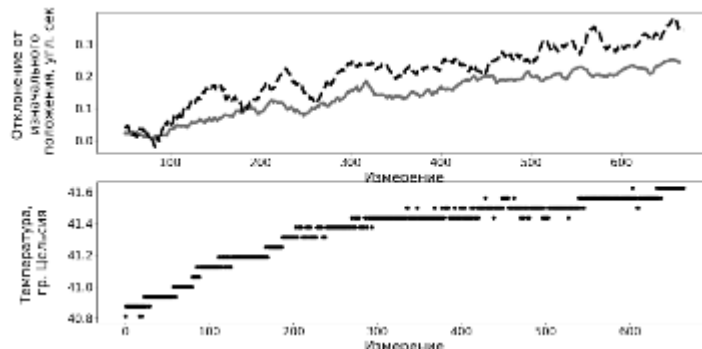


Рис. 3. График отклонения показаний автоколлиматора от изначального положения автоколлимационной марки (черная пунктирная линия – правая марка, серая сплошная линия – левая марка) и зависимость температуры от номера измерений.

Для фильтрации шума определения углового положения использовано оконное усреднение по 50 измерениям. Наклон трендов автоколлимационных марок отличается. Это говорит о пространственно неоднородном временном эффекте. Температура снималась напрямую с матричного фотоприемника с помощью написанного программного обеспечения. Температура, за время эксперимента изменилась примерно на 1 градус Цельсия. Зависимость температуры от времени – нелинейная. Были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона данных об отклонении углового положения двух автоколлимационных марок от температуры. Они составили $r \approx 0.94$, что говорит о сильной корреляции отклонений показаний автоколлиматора от температуры. Следует отметить возможность наличия ложной корреляции, так как и показания автоколлиматора и температура могут зависеть от времени. Однако, учитывая стационарность установки, с точки зрения физики процесса, наиболее вероятной причиной, обуславливающей дрейф является температура матричного фотоприемника. Для стабилизации температурных

показателей создан макет системы охлаждения автоколлиматора с использованием элемента Пельтье (рис. 4)

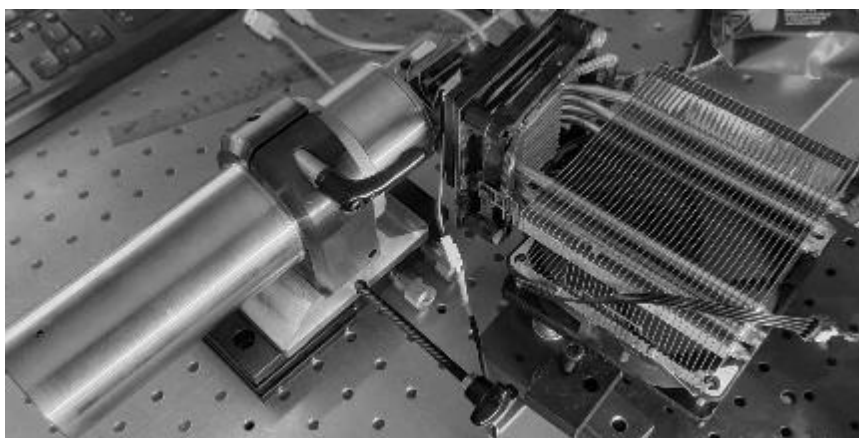


Рис. 4. Макет системы охлаждения, основанный на элементе Пельтье

Макет состоит из элемента Пельтье, маленького вентилятора 40x40 мм, башенного кулера с вентилятором на 160 Вт отводимого тепла. Такая конструкция необходима для быстрого понижения температуры матричного фотоприемника с помощью конвекции. Воздух внутри камеры с элементом Пельтье охлаждается примерно до 6 градусов Цельсия. Далее, с помощью маломощного вентилятора, холодный воздух обдувает заднюю поверхность платы матричного фотоприемника, что обеспечивает бесконтактную, быструю передачу холода, что позволяет контролировать температуру матрицы с малой инерцией. Башенный кулер необходим для отвода тепла с горячей стороны элемента Пельтье, что позволяет обеспечить бесперебойную длительную работу системы охлаждения. Путем регулировки расстояния до матричного фотоприемника регулируется его стабильная температура. Благодаря элементу Пельтье возможно охладить матрицу до 14-19 градусов Цельсия. Такая температура, в перспективе, позволит обеспечить уменьшение теплового шума матричного фотоприемника. Однако, на данный момент, температура намеренно не опускается ниже 25 градусов из-за риска короткого замыкания благодаря каплям конденсата, образуемого ниже температуры росы $t_{\text{росы}} \approx 23^\circ$ (для комнатной температуры в лаборатории). В перспективе, возможно заменить башенный кулер на отводимую систему водяного охлаждения, и передачу холода матричному фотоприемнику с помощью диэлектрических теплопроводящих материалов с предварительным лакированием электрических элементов для исключения короткого замыкания. Это позволит опустить температуру матричного фотоприемника ниже температуры росы, что снизит тепловой шум и позволит увеличить точность цифрового автоколлиматора.

Заключение

В работе представлены графики отклонений показаний автоколлиматора в двух различных рабочих точках и температуры матричного фотоприемника. По результатам эксперимента сделаны выводы о зависимости отклонений показаний автоколлиматора от температуры. Для решения проблемы дрейфа погрешности автоколлиматора реализован макет системы охлаждения, основанный на элементе Пельтье для стабилизации рабочей температуры. Конструкция системы охлаждения позволяет бесконтактным способом охлаждать фотоприемник с высокой скоростью. Разное механическое базирование автоколлиматора и системы охлаждения позволяет исключить вибрационные влияния вентиляторов на его показания.

Список литературы

1. Igor Konyakhin, Van Phong Hoang, Yury Artemenko, Renpu Li, Andrey Smekhov. Optic electronic system for measuring the three-dimensional angular deformation of pipe sections at large constructions
2. Ralf D. Geckeler, Andreas Just. Distance-dependent influences on angle metrology with autocollimators in deflectometry
3. Ralf D. Geckeler, Andreas Just, Michael Krause, Valeriy V. Yashchuk. Autocollimators for deflectometry: Current status and future progress

ЛАЗЕРНОЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОДЛОЖЕК НИТРИДА КРЕМНИЯ Si_3N_4

ГРИБОВСКАЯ О.С.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе исследованы особенности лазерного микроstructuring подложек нитрида кремния Si_3N_4 . Проведены экспериментальные исследования влияния параметров лазерного излучения (скорости сканирования и частоты) на шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что оптимальными режимами обработки являются режимы с высокой скоростью сканирования и низкой частотой лазерного излучения. Результаты работы могут быть использованы для создания устройств с невысокими оптическими потерями.

Ключевые слова: лазерная обработка, лазерные технологии, нитрид кремния, микроstructuring

Введение

Нитрид кремния (Si_3N_4) представляет собой химическое соединение, образующееся в результате взаимодействия атомов кремния и азота. Этот материал, благодаря своим уникальным свойствам, стал одним из наиболее востребованных полупроводников в промышленности. Si_3N_4 находит широкое применение в различных областях, включая производство интегральных фотонных схем, создание микрорезонаторов с выдающимися характеристиками, разработку волноводов с минимальными потерями и производство нелинейно-оптических устройств [1].

В микроволновых фотонных системах и при обработке оптических сигналов устройства, созданные на основе нитрида кремния, демонстрируют высокую производительность. Они также используются при генерации частотной гребенки и интегрированной оптической фильтрации.

Среди преимуществ Si_3N_4 можно выделить низкие оптические потери, достигающие 0,034 дБ/м, высокую добротность, достигающую 10^8 , широкий диапазон оптической прозрачности, охватывающий 0,3–4,6 мкм, отличную термическую стабильность и совместимость с процессами изготовления КМОП-матриц [2].

Устройства на основе нитрида кремния особенно востребованы в областях, где требуется высокое оптическое качество. Кроме того, Si_3N_4 находит широкое применение в различных отраслях промышленности и науки:

- а) Автомобильная промышленность, где нитрид кремния используется для изготовления компонентов двигателей, турбонагнетателей и систем клапанов.
- б) Производство подшипников, где Si_3N_4 применяется благодаря высокой твердости и низким коэффициентам трения.
- в) Металлообработка, где Si_3N_4 используется в качестве режущего инструмента для высокоскоростной обработки.

г) Электроника, где нитрид кремния выступает в роли изолирующего слоя в интегральных схемах.

д) Медицина, где Si_3N_4 применяется при протезировании костей.

е) Аэрокосмическая промышленность, где нитрид кремния используется для систем тепловой защиты.

ж) Химическая промышленность, нацеленная на создание коррозионностойких компонентов.

з) Энергетическая отрасль, связанная с производством солнечных батарей.

Одной из быстро развивающихся отраслей применения нитрида кремния является изготовление фотонных интегральных схем (ФИС). Наиболее распространёнными устройствами в фотонных интегральных схемах являются волноводные структуры и модуляторы из Si_3N_4 . Наиболее важной их характеристикой являются оптические потери.

Волноводы с невысокой контрастностью демонстрируют наименьшие оптические потери, измеряемые в сотых долях децибел на сантиметр. Стоит подчеркнуть, что на потери света влияют как собственное поглощение материалов волноводов, так и неровности на их боковых поверхностях. Очевидно, что при одинаковой шероховатости стенок потери из-за неровностей будут более заметны в волноводах с меньшим ограничением поля, например, с более высоким показателем преломления. Поэтому для создания устройств с минимальными потерями целесообразно использовать волноводы с низким контрастом показателя преломления.

Однако для применений, где основной задачей является достижение требуемой функциональности при минимальных размерах и где потерями можно в некоторой степени пренебречь, предпочтительны такие материалы, как Si_3N_4 и Si [3]. Для минимизации потерь в волноводах при лазерной обработке поверхности необходимо тщательно подобрать параметры, которые позволят снизить шероховатость поверхности подложки нитрида кремния до минимума.

Методология

Экспериментальная работа проводилась с использованием лазерной установки МикроСЕТ (производства ООО «Лазерный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация). Данная установка оснащена волоконным иттербиевым лазером, который позволяет создавать структуры с минимальным размером элемента около 25 микрон. С помощью этой системы производятся различные устройства на таких предприятиях, как ОАО «НПП «Пульсар», ОАО «Ижевский электромеханический завод «Купол», ОАО «Завод «Магнетрон» и др. На рисунке 1 представлена фотография этой лазерной установки.



Рис. 1 – Лазерная установка МикроСЕТ

Для изучения влияния различных условий лазерного облучения на поверхность нитрида кремния была проведена серия экспериментов. В ходе этих экспериментов был изготовлен эталонный образец с заданным рисунком шероховатости. Шероховатость каждого образца была измерена с помощью профилометра Norgau Industrial NSRT-100. Для каждого образца было проведено три измерения, и для каждого измерения было рассчитано среднее арифметическое значение.

На рисунке 6 показан контрольный образец с шероховатостью 0.05 мкм.

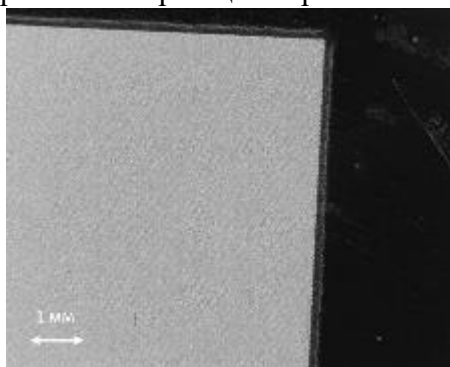


Рис. 2 – Сравнение эталонного образца с необработанной поверхностью

Из-за ограничений в точности доступных измерительных приборов невозможно точно измерить шероховатость поверхности необработанного материала, т.к. щуп профилометра повреждает полированную поверхность и искажает результаты измерений. Поэтому для целей данного исследования этому параметру было присвоено значение 0 микрон.

Контрольный образец был подготовлен путем нанесения на него диагональных линий под углами 45 и 135 градусов с расстоянием между линиями 0,05 мкм и размером 12 на 12 мм.

После лазерной обработки все образцы были очищены с помощью изопропилового спирта, ватных тампонов и безворсовых салфеток.

Результаты

Первым параметром, который необходимо изучить, является скорость сканирования лазерного луча. На рисунке 3 мы видим поверхность после обработки с разной скоростью и разной частотой.

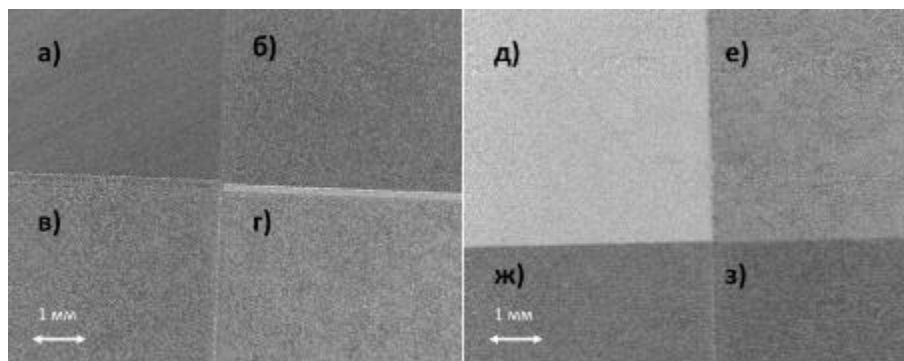


Рис. 3 – Поверхность после обработки с различной скоростью сканирования при частоте 40 кГц: а) 100 мм/с, б) 200 мм/с, в) 300 мм/с, г) 400 мм/с; с различной частотой сканирования при скорости сканирования 100 мм/с: д) 50 кГц, е) 100 кГц, ж) 200 кГц, з) 250 кГц.

На поверхности, обработанной с меньшей скоростью сканирования, мы можем увидеть больше диоксида кремния, оставшегося после очистки изопропиловым спиртом, что можно

объяснить меньшим количеством кремния, вступившего в реакцию с кислородом. Это коррелирует с меньшей температурой поверхности. Значения шероховатости (параметр R_a) для образцов а, б, в и г составили 0,405, 0,369, 0,31 и 0,237 мкм соответственно. Эти результаты согласуются с результатами визуального анализа. Таким образом, можно сделать вывод, что при обработке нитрида кремния более приемлемо использовать режимы обработки с большей скоростью сканирования лазерного пучка.

На рисунке 3(б) мы видим, что режим, который использует наименьшую частоту следования импульсов, имеет наиболее однородную поверхность, на которой нет “зерен”, как у большинства предыдущих образцов, и который более однороден по цвету. Это может быть основой для разработки режимов лазерной полировки. Значения шероховатости для образцов д, е, з и ж составили 0,164, 0,186, 0,251 и 0,403 мкм соответственно. Эти результаты согласуются с результатами визуального анализа. Следовательно, можно сделать вывод, что при обработке Si_3N_4 более приемлемо использовать режимы обработки с меньшей частотой следования импульсов.

Заключение

В ходе исследования было установлено, что максимальная однородность поверхности подложек нитрида кремния после лазерной обработки достигается при использовании больших скоростей сканирования лазерного пучка и более низкой частоты следования импульсов. Данные результаты могут быть использованы для разработки эффективных режимов полировки поверхности.

Однако эксперименты показывают, что сочетание всех наилучших выявленных параметров лазерного воздействия не обязательно приведет к удовлетворительному результату, но путем экспериментальных проб и численного моделирования результатов можно получить наилучший режим постобработки для очистки и полировки поверхности, который будет максимально деликатным для пластин нитрида кремния. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию комбинированных режимов обработки для достижения меньшей шероховатости поверхности.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для создания фотонных интегральных схем с минимальными оптическими потерями.

Список литературы

1. Richerson D. W., Freitag D. W. Silicon nitride (Si_3N_4): material properties and applications [Электронный ресурс] / Oak Ridge National Laboratory. – Oak Ridge, 2026. – URL: <http://www.ms.ornl.gov/programs/energyeff/cfcc/iof/chap21-2sin.pdf> (дата обращения: 15.04.2026).
2. Huang, Y., Yu, Y., Yu, C., et al. On-chip High-Q Micro-ring Resonators and Their Applications in Microwave Photonics (Invited) // Acta Photonica Sinica. — 2026. — Vol. 55, No. 3. — Art. 0355101.
3. Башкатов А. С., Корнилов С. В., Морозова О. Н. СОСТОЯНИЕ И ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ФОСФИДЕ ИНДИЯ, НИОБАТЕ ЛИТИЯ И КРЕМНИИ //РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ: ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ 2023. – С. 2.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

ЛАВРИНЕНКО В.В.¹, РОДИОНЧИКОВА А.Д.^{1,2}, ЕГОРОВА У.С.^{1,2}, ВАСИЛЬЕВА А.В.¹, ПАРФЁНОВ В.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Аннотация. В работе исследованы режимы лазерной обработки нержавеющей стали, которые позволяют уменьшить шероховатость поверхности литейных форм для изготовления микрофлюидных чипов, а также получить оксидный слой на поверхности объекта. Были проведены исследования на коррозионную стойкость образцов, полученных при режимах лазерного воздействия, которые приводят к эффекту полировки и образованию интерференционной оксидной пленки. С помощью атомно-силовой микроскопии были получены морфологии поверхностей образцов после воздействия трёх типов жидкостей по водородному остатку. Результаты исследования позволили выявить наиболее подходящие режимы лазерной обработки, при которых обработанная поверхность подвергается коррозии в меньшей степени.

Ключевые слова: микрофлюидика, литейные формы, коррозионная стойкость, шероховатость, лазерная обработка, абляция, полировка, коррозия, оксидная плёнка, кислота, щелочь, нейтральная среда

Введение

Микрофлюидика как отдельная научная дисциплина занимается изучением поведения и управлением потоков жидкости в микронном масштабе. За последние несколько десятилетий микрофлюидные методы стали практически незаменимыми в решении ряда производственных и исследовательских задач [1]. Микрофлюидные чипы могут быть изготовлены из широкого спектра материалов, включая стекло, полимеры, металлы и сплавы, а в зависимости от используемого материала микрожидкостный рисунок возможно создать с помощью различных технологий производства [2]. В связи с этим проводятся многочисленные исследования по поиску новых или модернизации уже имеющихся способов изготовления подобных устройств, направленные на упрощение и снижение стоимости технологии их производства.

Использование лазерных технологий является альтернативным методом получения сложных топологий на различных поверхностях [3]. Создание микрофлюидного рисунка с помощью лазерной микрообработки имеет ряд особенностей и преимуществ по сравнению с другими технологиями производства, например, отсутствие механического контакта с материалами и высокая адаптивность к изменениям в технологическом процессе, а использование металла в качестве материала уменьшает стоимость производства литейных форм, а также может увеличить срок их службы.

Однако, в микрофлюидике происходит непосредственный контакт материала заготовки с различными химическими веществами непосредственно при использовании или при различного рода очистках образца, поэтому необходимо учитывать химическую стойкость используемых материалов после обработки. Металл может легко подвергаться воздействию коррозии при прямом контакте с различными жидкостями. В связи с этим необходимо модифицировать поверхности литейных форм из нержавеющей стали таким образом, чтобы увеличить коррозионную стойкость данного материала и, следовательно, срок службы данной заготовки для изготовления микрофлюидных чипов.

Материалы и методы

Эксперименты проводились на металлической пластине из нержавеющей стали марки AISI 304 толщиной 2 мм, которая подвергалась воздействию прецизионным лазерным маркером “МиниМаркер2” (ООО “Лазерный Центр”, Россия) с длиной волны порядка 1 мкм. Характеристики данного лазерного маркера представлены в таблице 1. Лазерное воздействие производилось в несколько этапов, в ходе которых менялись такие параметры обработки, как длительность импульса, мощность, частота повторения импульсов, плотность заливки и скорость сканирования лазерного луча.

Таблица 1

Основные характеристики “МиниМаркер2”

Характеристика	Значение
Длина волны	1064 нм
Длительность импульса	От 1 до 350 нс
Средняя мощность	30 Вт
Частота следования импульсов	До 4000 кГц
Скорость сканирования	До 8000 мм/сек
Поле обработки	110 × 110 мм
Разрешение	0,1 мм

Оценка шероховатости поверхности после лазерной обработки проводилась с помощью профилометра Industrial NSRT-100 (“NORGAU”, Россия). Погрешность измерения параметра шероховатости R_a составила порядка 5%. Оценка параметра шероховатости в процессе исследования составляла среднее значение после 5 замеров щупа в различных областях зоны, подвергавшейся воздействию лазера.

Для определения коррозионной стойкости металлической поверхности после лазерной обработки, образцы материала были оставлены на 30 дней, погруженные в ванны с 3 разными жидкостями: в 9% уксусную кислоту (pH 3), в воду (pH 7) и в раствор соды (pH 10). Значения водородного остатка жидкостей были измерены с помощью лакмусовых индикаторных полосок.

Для определения последствия влияния коррозии на металл с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Aura (ООО «НТ-МДТ», Россия) были созданы 3D карты рельефа, благодаря которым можно судить о морфологии поверхности образцов после месяца нахождения в жидких средах.

Экспериментальные результаты

С помощью лазерной микрообработки стали были созданы 3D структуры литейных форм с микрофлюидной топологией (рис. 1). Шероховатость (параметр R_a) созданной модели до лазерной обработки составляла порядка 0,654 мкм, а после – 0,457 мкм. После лазерного воздействия значение шероховатости поверхности уменьшилось, но всё равно остаётся достаточно высоким, что может повлиять на морфологию каналов отливаемой микрофлюидной формы. В связи с этим были разработаны новые полировочные режимы для уменьшения параметра R_a (рис. 2, а). Созданные образцы с новыми параметрами лазерной полировки (рис. 2, а, слева) показали шероховатость 0,088 мкм. Необходимо исследовать, как образец будет реагировать на различные жидкости при непосредственном контакте. Для проведения эксперимента по коррозионной стойкости были созданы также образцы с оксидной плёнкой на поверхности (рис. 2, а, справа), которая может выступать в

роли защитного слоя, препятствуя прямому контакту металла и жидкой среды. Шероховатость образцов с оксидной плёнкой до эксперимента составляла 0,270 мкм.

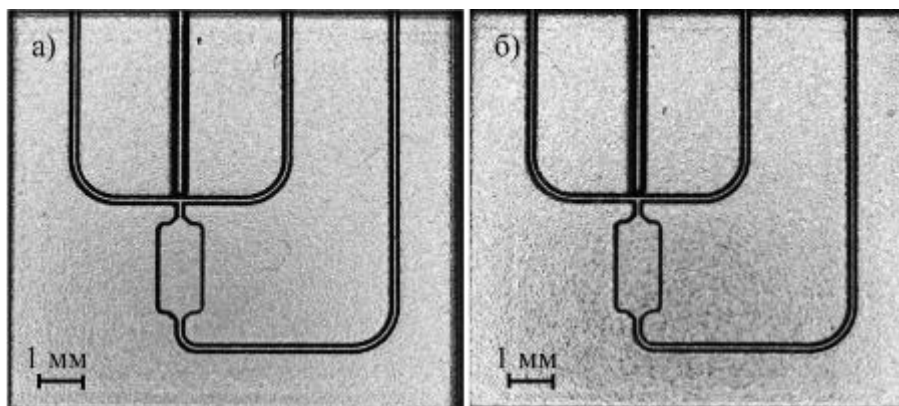


Рис. 1. Фотографии литейных форм на нержавеющей стали: а) до полировки, б) после полировки

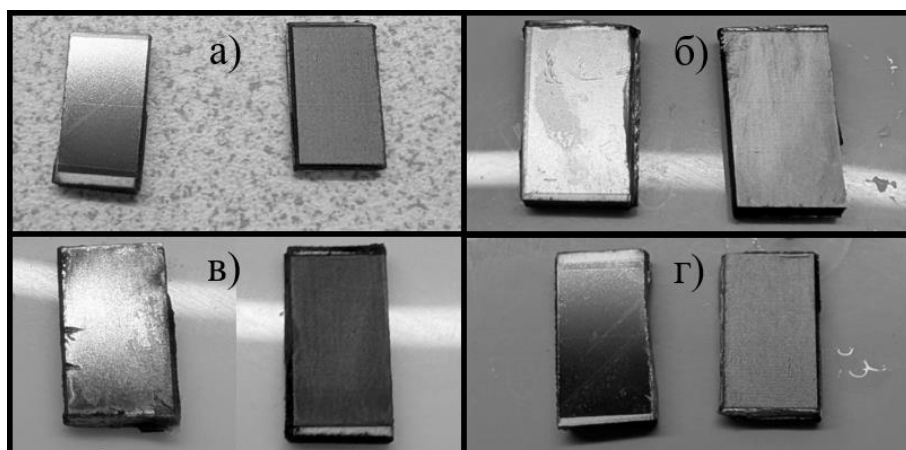


Рис. 2. Фотографии обработанных областей (слева – полированный, справа – с оксидной плёнкой): а) до воздействия, б) после кислоты, в) после нейтральной среды, г) после щелочи

Образцы, находившиеся в кислой среде, подверглись значительному коррозионному влиянию, последствия которого были видны невооруженным глазом (рис. 2, б). После проведения эксперимента в жидкости и на самих образцах наблюдались частички металла с характерным чёрным цветом. Помимо этого, можно было заметить, что оксидный слой с поверхности образца полностью отошёл.

Замачивание образцов в нейтральной среде также, как и в случае с уксусной кислотой, оказывало на металл достаточно сильное воздействие (рис. 2, в). По истечении месяца в объёме с жидкостью и на поверхности образцов обнаруживались частички металла с характерным бурым оттенком.

Пребывание образцов в щелочной среде не привело к видимым разрушениям поверхности (рис. 2, г). В течение всего срока проведения эксперимента не было обнаружено никаких пятен и зёрен коррозии, а также частиц металла.

Для подтверждения наличия коррозии на поверхности образцов были созданы 3D карты поверхности с помощью АСМ. Ниже приведены данные по исследованию поверхности металла с оксидной плёнкой (рис. 3), которые практически аналогичны информации, полученной на образцах с полированной с помощью лазерного воздействия поверхностью.

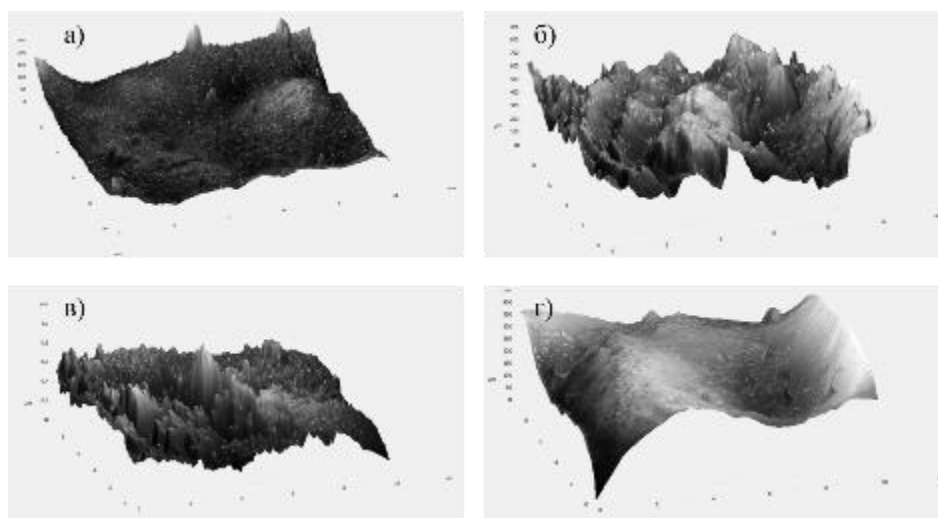


Рис. 3. 3D карты поверхности обработанных образцов: а) до воздействия, б) после кислоты, в) после нейтральной среды, г) после щелочи

На поверхности металла до воздействия сред (рис. 3, а) видны частички нанопыли, которые образовались в процессе абляции, что уже наблюдалось в более ранних экспериментах [4]. После воздействия кислоты (рис. 3, б) на поверхности образовались сильные перепады высот, которые могут означать, что после контакта со средой на поверхности образца остались небольшие «островки» оксидной плёнки. У образцов в нейтральной среде (рис. 3, в), также, как и в кислой, можно наблюдать наличие большого количества дефектов и неоднородностей, что может свидетельствовать о том, что коррозия также эффективно распространяется в металле. Карты поверхности образца в щелочной среде (рис. 3, г) подтверждают, что раствор соды не оказывает значительного влияния на металл.

Заключение

С помощью лазерной обработки удалось создать литейные формы из нержавеющей стали. Для улучшения качества поверхности форм были получены 2 основных режима модификации поверхности: полировочный и с образованием оксидной плёнки. Исследования коррозионной стойкости полированной поверхности, полученной после лазерного воздействия, показало, что металлическая поверхность подвергается разрушению при нахождении в кислой и нейтральной средах, хоть и в меньшей степени, чем поверхности с оксидными пленками, которые не обладают дополнительными защитными свойствами. Наименьшее воздействие на обработанную лазером поверхность оказывает щелочная среда. Это делает полученные металлические заготовки потенциально пригодными для работы с щелочными растворами и компонентами. Требуются дальнейшие исследования коррозионной стойкости модифицированной лазерным излучением поверхности.

Список литературы

1. Поддушов М. А. Разработка DIY-установки для капельной микрофлюидики // Научное приборостроение. 2023, т. 33, № 3. С. 3-26.
2. Niculescu A.-G., Chircov C., Bîrc ă A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review // Int. J. Mol. Sci. 2021, No 22. 26 p.
3. Посмитная Я. С., Букатин А. С., Макаров Д. А. и др. Альтернативные подходы при создании мастер-форм для изготовления микрофлюидных чипов методом "мягкой" литографии // Научное приборостроение. 2017, т. 27, № 2. С. 13-20.

4. Лавриненко В.В., Васильева А.В., Парфенов В.А., Новиков И.А. Исследование формирования микрофлюидной топологии с использованием инфракрасного импульсного лазера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024, т. 17, № 3.2. С. 173–176.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА НАТУРНОЙ МОДЕЛИ С ИМИТАЦИЕЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КОЖИ

МЕЦКЕР В.С.¹,

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В рамках работы исследована возможность измерения характеристик распространения ультразвуковых волн для количественной оценки состояния рубцов кожи. Исследования проведены на имитаторе реального объекта контроля – желатиновом блоке со встроенными в него моделями неоднородностей. Проведены измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн и оценка затухания, позволяющие оценить различия в исследуемых моделях при двух схемах измерений – сквозного и поверхностного прозвучивания.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, рубцы кожи, неоднородности кожи, модели неоднородностей, продольная волна

Введение

В ходе восстановительного процесса после травматического воздействия на кожу существует высокая вероятность возникновения рубцов. Формирование патологических рубцов может привести к ухудшению качества жизни человека, ограничивая подвижность суставов и двигательную функцию организма, что в свою очередь может привести к нетрудоспособности. Спрогнозировать степень формирования рубцовой ткани достаточно сложно. Поэтому возникает необходимость в своевременной диагностике рубца в процессе его формирования для выявления рисков развития патологий, а также правильного выбора и корректировки лечения. Используемые на сегодняшний день неинвазивные методы оценки качества рубцов в основном субъективны, а единственным достоверным методом является гистология, однако такое исследование приводит к дополнительной травматизации [1-3].

Ультразвуковые исследования широко используются в медицинской практике, так как является безопасным и неинвазивным методом диагностики. Анализ доступной литературы показал, что чаще всего для задачи оценки качества рубцов ультразвуковыми методами использовалась аппаратура высокочастотной ультразвуковой визуализации (ВЧ УЗИ), которая используется для диагностики внутренних органов [4-7]. Но, несмотря на доступность такой аппаратуры, широкого распространения для задач диагностики рубцов она не получила. Быстрая и простая оценка качества рубцово-измененных тканей возможна при использовании более простых методов по сравнению с приборами ВЧ УЗИ.

Ультразвуковые методы используются для исследования физико-механических свойств различных материалов. По изменению таких параметров, как затухание и скорость распространения ультразвуковых волн можно определять структуру материала, а также механические свойства, такие как упругость и плотность. Так, например, в медицине измерение скорости распространения ультразвуковых волн используется для определения состояния костной ткани, выявляя нарушение прочности [8].

На основании проведенного анализа литературы и с учетом поставленной задачи разработки методик и аппаратуры для количественной оценки качества рубцов были выбраны методы, основанные на измерении характеристик распространения ультразвуковых волн – скорости и затухания.

Для корректного сопоставления результатов диагностики необходимо подобрать оптимальные способы измерения акустических характеристик и учитывать факторы, влияющие на точность измерений. Поэтому возникла необходимость в проведении некоторых предварительных этапов эксперимента на натурной модели исследуемого объекта с целью выбора предпочтительных для применения в реальных условиях способов определения характеристик распространения ультразвуковых волн.

Материалы и методы

В качестве упрощенной модели неоднородностей структуры кожи в данной работе использовался блок пищевого желатина со специально встроенными в него в процессе изготовления моделями дефектов. Желатин является основой и одним из основных компонентов для создания фантомов, имитирующих мягкие ткани человека, кроме того, он обладает схожими с человеческим телом акустическими характеристиками [9]. Желатиновый блок был изготовлен в виде параллелепипеда с размерами 35x50x90 мм. В качестве моделей дефектов были выбраны материалы с пористой структурой для исключения резко выраженных границ между основным материалом и встроенной моделью. Форма модели дефекта приближена к пластине, чтобы иметь возможность оценки перехода от основного материала к встроенной неоднородности, как над широкой площадкой, так и через узкую границу. Размещение в основном материале по возможности реализовано на разной глубине от поверхности желатинового блока. Используемые материалы - марля и вата - отличаются от основного материала по скорости распространения ультразвуковых волн не существенно. Измерения выполнены с использованием универсального ультразвукового толщиномера УДТ-40 (ООО «НПЦ НК «Кропус») и прямых раздельных преобразователей с рабочей частотой 2,5 МГц. Для измерения характеристик распространения ультразвуковых волн используются методы прохождения, которые можно разделить на методы сквозного и поверхностного прозвучивания. На рисунках 1-2 представлены используемые схемы измерения.

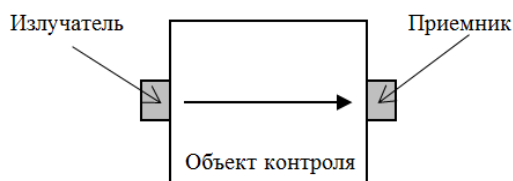


Рис.1. – Схема контроля методом сквозного прозвучивания

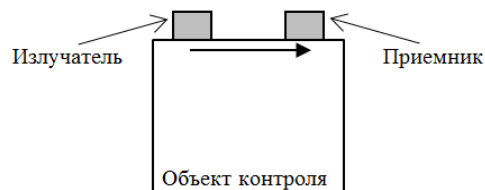


Рис.2. – Схема контроля методом поверхностного прозвучивания

В проведенной серии экспериментов на объекте контроля – желатиновый блок – была определена скорость распространения продольной ультразвуковой волны в чистом материале, а также исследовано влияние встроенных дефектов на изменение акустических характеристик. Поскольку дефекты были добавлены в исследуемый материал на этапе его изготовления, то было обеспечено хорошее соединение между материалом и дефектом, отсутствие разрывов материала и резкой границы между ними.

Пример измерения скорости продольной ультразвуковой волны по схеме контроля методом поверхностного прозвучивания на исследуемом объекте с дефектом «вата» представлен на рисунке 3.



Рис.3. – Измерение скорости продольной ультразвуковой волны по схеме контроля методом поверхностного прозвучивания

Результаты

Результаты измерения скорости продольной ультразвуковой волны в материале-имитаторе реального объекта контроля в зависимости от схемы измерений и вида встроенного дефекта приведены в табл.1.

Таблица 1

Результаты измерения скорости продольной ультразвуковой волны в модели

Тип дефекта	Номер измерения	Скорость, м/с	
		Метод сквозного прозвучивания	Метод поверхностного прозвучивания
Чистый материал без дефектов	1	1437	1444
	2	1423	1437
	3	1445	1462
	Ср.знач.	1440	1450
Марлевая пластина	1	1424	1448
	2	1468	1470
	3	1470	1443
	Ср.знач.	1450	1450
Плотно встроенная вата	1	1420	1495
	2	1573	1478
	3	1490	1483
	Ср.знач.	1490	1490
Менее плотно встроенная вата	1	1454	1452
	2	1459	1457
	3	1462	1460
	Ср.знач.	1460	1460

Диапазон изменения скорости, полученный при двух схемах измерения, в модели без встроенных дефектов составляет от 1423 до 1462 м/с, то есть отличие максимального и минимального значения менее 3%. С учетом того, что измерения выполнены на разных

участках модели с применением различных схем, полученные сходимость и воспроизводимость результатов весьма высокие.

Влияние встроенных дефектов на изменение скорости звука, как в сторону повышения, так и понижения по сравнению с бездефектным материалом, наблюдается в случае, когда вата уложена плотно. При не плотно уложенной вате и марле изменения скорости не обнаружено, в том числе, по сравнению с чистым материалом, однако сигнал заметно затухает и имеет низкую амплитуду.

При измерениях по схеме поверхностного прозвучивания была проведена также некоторая оценка затухания. Для чего, сначала при измерении на дефектном участке амплитуда первого прошедшего импульса устанавливается на уровне порога 15% при максимальном усилении 110 дБ, затем при измерениях на чистом материале сигнал с помощью регулировки усиления уменьшается до такого же порога. Тогда разница в усилении и будет являться оценкой затухания. В данном случае сигналы при измерении акустических характеристик в бездефектной модели и на дефектном участке отличаются на 16 дБ. Соответственно, некоторые типы дефектов можно оценивать по степени затухания ультразвуковых волн.

Выводы.

Опробованы две схемы измерения акустических характеристик – сквозного и поверхностного прозвучивания.

Определено наличие изменения скорости продольной ультразвуковой волны в зависимости от плотности дефекта. При этом различие скорости продольной ультразвуковой волны в бездефектном материале и в области со встроенными дефектами наблюдается не на всех видах дефектов и может выявляться при разных схемах контроля.

Установлена возможность оценки затухания ультразвуковых волн на некоторых моделях дефектов при измерениях по схеме поверхностного прозвучивания. Например, для дефекта в виде плотно уложенной марли удалось произвести оценку затухания сигнала в области дефекта в объекте контроля по сравнению с чистым материалом.

Полученные результаты и опробованные способы измерения могут быть использованы при дальнейших исследованиях на реальных образцах кожи с рубцами.

Определение возможности применения ультразвука для диагностики рубцов и разработка соответствующих методик и аппаратуры позволит производить количественную оценку рубцово-измененных тканей в процессе их формирования, а также исследовать влияние фармацевтических препаратов на процесс лечения.

Список литературы

1. Рубцы кожи: Современные представления об этиопатогенезе, клинике и диагностике / Прохоров Д.А., Щербенёва А.А. Нгема М.А., Испирьян М.Б., Кузнецова М.Ю. // Крымский терапевтический журнал – 2021 – №2. – С. 18-24
2. A systematic review of objective burn scar measurements / Lee K.C., Dretzke J., Grover L., Logan A. // Burns Trauma. 2016, Т. 14. pp. 14-33
3. Пат. RU №2655115 С2 Способ определения состояния рубца кожи / Поздеев А.Р., Вавилов А.Ю., Морозов Д.В., Коротун В.Н, Поздеева О.А., Оpubл. 2018.05.23
4. Трыкова И.А. Ультразвуковое исследование в диагностике и выборе тактики лечения пациентов с рубцовыми деформациями покровных тканей: дисс. канд. мед. наук / Москва, 2013. – С. 125
5. Романец О.П. Методы оптимизации лечения и профилактики рубцов: дисс. канд. наук / Москва, 2016 – С. 179
6. Diagnostic Value of 20 MHz High-Frequency Ultrasound for Skin Scars / Wang X., Yang R.Q., Yang Y.T., Liu H., Yang Q., Tian X., Yan H.// J Third Mil Med Univ. 2020, № 39. pp.853-860

7. Ерофеев С.В., Анисимов А.В., Шильт М.Я. / Объективизация оценки состояния рубцов кожи высокочастотным ультразвуковым методом (поисковое исследование) // Мат. VI Всеросс. Съезд судебных медиков, Тюмень 2005 – С. 92
8. Пат. RU 2303398 C1 Способ диагностики остеопении и остеопороза при ультразвуковой денситометрии / Сафронов О.В., Усольцева Е.Н., Брюхина Е.В., Сандаков И.П., Оpubл. 27.07.2007
9. Создание модели тренажёра для отработки навыка пункции полостной системы почки под ультразвуковым контролем. / Гаджиев Н.К., Мищенко А.А., Бритов В.П., Хренов А.М., Горелов Д.С., Обидняк В.М., Григорьев В.Е., Семенякин И.В., Петров С.Б. // Вестник урологии. – 2021 – №9(1) – С. 22-31

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

ПАВЛОВА С.В., ПЕТРОВ Г.К., ИВАНОВ П.А.

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

Аннотация. В работе предложена система управления движением мобильного робота по заданной траектории с использованием датчика линии, с помощью которой может осуществляться настройка калибровочных параметров. Представлена структура системы, сочетающей в себе два метода выработки навигационных параметров. Проанализированы основные источники погрешностей визуальной навигации. Показано, что данный подход позволяет обеспечить воспроизводимость условий эксперимента и упростить процедуру оценки точности восстановленной траектории движения робота.

Ключевые слова: мобильный робот, визуальная одометрия, траектория движения объекта, инерциальная навигационная система

Введение.

В последнее время широкое распространение находят роботы на основе беспилотных платформ летательного и колесного типа [1]. Наиболее значимые задачи в этой области связаны с навигацией автономных систем. Существуют различные методы выработки навигационных параметров: спутниковая, инерциальная и визуальная навигация. Спутниковые системы определяют координаты объекта путем измерения расстояния от него до спутников, положение которых известно с определенной точностью. Однако, такие системы зависят от наличия и качества внешних сигналов. С другой стороны, для решения задач ориентации и навигации широко применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [2]. Инерциальные системы основаны на измерении ускорений и угловых скоростей, которые позволяют определять положение связанной с объектом системы отсчета в пространстве. Одним из существенных недостатком инерциальных систем является накопление ошибки с течением времени.

Визуальные методы выработки навигационных параметров основаны на обработке и анализе видимой информации. Такие подходы обладают рядом преимуществ, включая высокую информативность измерений и относительную простоту аппаратной реализации. Очевидно, что точность визуальной одометрии существенно зависит от условий наблюдений, а также от параметров калибровки оптических камер и характеристик алгоритмов обработки получаемых с них изображений.

По отдельности каждый из методов имеет свои ограничения и недостатки, однако, обладают и рядом преимуществ. Целью данной работы является разработка комплексированного метода, сочетающего в себе принципы визуальной одометрии и инерциальной навигации и последующее его внедрение в систему управления движением мобильного робота по заданной траектории.

Структура системы управления для мобильного робота.

Мобильный робот представляет собой колесную платформу, использующую кинематический способ поворота для изменения траектории движения. Такая схема платформы наиболее распространена для колесной техники в целом, следовательно, предложенное решение обладает универсальностью для отработки алгоритмов управления движением и навигации.

Система управления движением мобильного робота состоит из трех блоков: основная система, блок управления электромеханическими преобразователями и дополнительная система. Основная система состоит из ЭВМ – микрокомпьютера Raspberry Pi 5, БИНС и стереопары, которые по отдельности вырабатывают навигационные параметры: три связанные с объектом координаты - x , y , z и три угла ориентации - Ψ , θ , γ . БИНС реализована по классической схеме и состоит из акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС). Стереопара представляет собой систему, состоящую из двух оптических камер и обеспечивает получение последовательности изображений окружающей сцены. Обработка информации, получаемой с БИНС и стереопары, производится в микрокомпьютере.



Рис. 1. Блок-схема системы управления движением мобильного робота.

Блок управления электромеханическими преобразователями состоит из сервоконтроллера, который выдает управляющие команды двигателям и сервомотору кинематического механизма поворота платформы. Дополнительная система управления движением мобильного робота состоит из триады инфракрасных датчиков (в предлагаемой конструкции платформы используются датчики линии) и обработчика информации, получаемой с датчиков. Дополнительная система применяется для определения параметров в основной системе. Блок-схема системы управления движением робота представлена на рисунке 1.

БИНС

Точность инерциальной навигационной системы зависит от характеристик применяемого в ней МЭМС модуля и точности его калибровки. Процедура калибровки таких датчиков требует применения дорогостоящего оборудования (поворотные моделирующие стенды), а также продолжительных по времени испытаний, что значительно увеличивает сложность их применения.

Визуальная одометрия

Работа визуальной системы реализуется в несколько этапов: выделение характерных признаков на изображениях, сопоставление признаков между последовательными кадрами

и оценка относительного перемещения камеры [1, 3]. На основе полученных оценок формируется траектория движения робота в выбранной системе координат. Результатом работы визуальной системы являются оценки ориентации и перемещения робота, а также восстановленная траектория его движения.

Источники погрешностей визуальной навигации

Точность визуальной навигации определяется совокупностью факторов, связанных с измерениями и обработкой информации. К основным источникам погрешностей относятся ошибки калибровки камеры, оптические искажения и шумы измерений [3].

Также, влияние на точность оказывает качество сопоставления признаков между последовательными кадрами. Наличие ошибочных соответствий и выбросов может приводить к искажению оценки перемещения объекта и накоплению ошибки в процессе последовательной обработки данных. Существенную роль играют условия освещённости и характер наблюдаемой поверхности, включая наличие или отсутствие текстурированных областей.

Дополнительным фактором является характер движения подвижной платформы. Резкие повороты, неравномерное движение и высокочастотные вибрации могут приводить к снижению точности восстановленной траектории ее движения и должны приниматься во внимание при проведении соответствующих оценок.

Методика оценки точности при движении по заданной траектории

Отличительной особенностью платформы является возможность проведения калибровки параметров одометрической и инерциальной систем за счёт ее движения по заданной траектории. Задание траектории осуществляется с использованием датчика линии, обеспечивающего следование робота по заранее определённому пути, и системы управления, которая позволяет воспроизводить траекторию движения, не используя системы визуальной одометрии и инерциальной навигации. Такой подход позволяет сформировать повторяемую геометрическую траекторию движения и упростить процедуру экспериментального сличения.

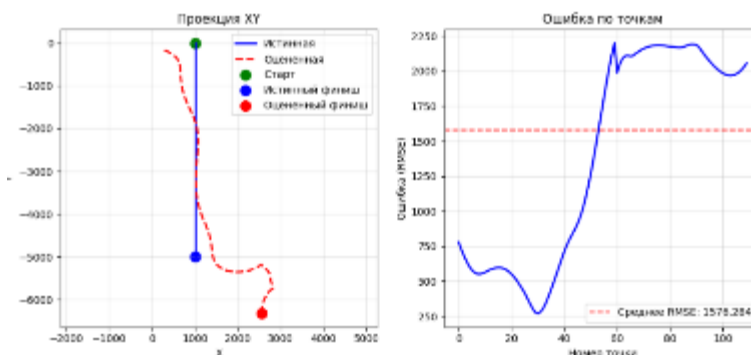


Рис. 2. Графический вывод вычисленной и заданной траектории.

В процессе движения платформы навигационная система формирует восстановленную траекторию на основе данных визуальной одометрии или БИНС. Оценка точности проводится путём сравнения геометрической формы восстановленной траектории с заданной траекторией движения. В качестве показателей точности могут использоваться накопленная ошибка по длине траектории δ (1), среднеквадратичная ошибка положения σ_r (2), а также воспроизводимость результатов при многократных запусках.

$$\delta = \frac{\|\hat{r}_N - r_N\|}{L} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: $\widehat{r}_N$ – оценка положения, r_N – заданное положение, L – длина эталонной траектории.

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \|\widehat{r}_i - r_i\|^2}, \quad (2)$$

где: $\widehat{r}_i$ – оценка положения, r_i – заданное положение, N – число измерений.

Предлагаемая методика ориентирована на использование в лабораторных условиях и может применяться на ранних этапах разработки алгоритмов визуальной навигации.

Заключение

В данной работе представлена система управления движением мобильного робота, сочетающая в себе принципы визуальной одометрии и инерциальной навигации. Отличительной особенностью разработанной системы является возможность упрощённой настройки калибровочных параметров визуальной и инерциальной навигационных подсистем за счёт движения робота по априорно известной траектории. Предложена методика оценки точности навигационной системы, основанная на сравнении геометрической формы восстановленной траектории с заданной, формируемой с помощью датчика линии. В качестве количественных показателей точности используются накопленная ошибка по длине траектории (δ) и среднеквадратичная ошибка положения (σ_r), что позволяет объективно сравнивать эффективность различных алгоритмов и производить их настройку.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016.2. Юревич Е. И. Основы робототехники. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016.
2. Анучин О.Н., Емельянцева Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации (БИНС и БИСО) / под общ. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2018.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ УРАВНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА

РОГАТЫХ Е.А., БАРОНОВА В.А.

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

Аннотация. Представлены результаты исследования точности методов аппроксимации градуировочной характеристики терморезистивного датчика температуры. Рассмотрены метод наименьших квадратов, кусочно-линейная аппроксимация, аппроксимация β формулой.

Ключевые слова: терморезистор, аппроксимация, МНК, аппроксимация β формулой, абсолютная погрешность.

Введение

Для измерения температуры могут применяться следующие типы датчиков: термопары и терморезисторы. Терморезисторы могут применяться в системах автоматического контроля температуры, бытовой электронике и измерительных устройствах для контроля климата. Наиболее широкое применение термисторы нашли в бытовых и встраиваемых системах, поскольку они обладают низкой стоимостью, высокой чувствительностью и достаточной точностью.

В данной работе рассматривается терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом, встроенный в датчик АМТ1001, для которого известна градуировочная характеристика. Зависимость температуры от сопротивления является нелинейной, что требует применения методов аппроксимации для использования в цифровых измерительных системах. Однако каждый вид терморезистора имеет уникальную температурную характеристику, что оставляет задачу аппроксимации температурной характеристики актуальной.

1. Кусочно-линейная аппроксимация

Рабочая область делилась на интервалы $[T_k; T_{k+1}]$, а затем на каждом интервале строилась линейная аппроксимация согласно формуле:

$$T(R) = T_k + \frac{T_{k+1} - T_k}{R_{k+1} - R_k} \cdot (R - R_k),$$

где R_k – начальное сопротивление на определенном интервале, R_{k+1} – конечное сопротивление.

При рассмотрении кусочно-линейной аппроксимации на 2 интервала получили следующие уравнения $T_1(R) = -1,36859(R - 28,267)$ при $R \in [10; 28,267]$ кОм и $T_2(R) = 26 - 4,3478(R - 9,621)$ при $R \in [4,101; 10]$ кОм.

При рассмотрении кусочно-линейной аппроксимации на 5 интервалов получили следующие уравнения:

$$\begin{aligned} T_1(R) &= -1,0105(R - 28,267) \text{ при } R \in [18,371; 28,267] \text{ кОм,} \\ T_2(R) &= 11 - 1,655(R - 17,61) \text{ при } R \in [12,172; 18,371] \text{ кОм,} \\ T_3(R) &= 21 - 2,6208(R - 11,697), \text{ при } R \in [8,263; 12,172] \text{ кОм,} \\ T_4(R) &= 31 - 4,0486(R - 7,959), \text{ при } R \in [5,736; 8,263] \text{ кОм,} \\ T_5(R) &= 41 - 6,26741(R - 5,537), \text{ при } R \in [4,101; 5,736] \text{ кОм.} \end{aligned}$$

Графики кусочно-линейной аппроксимации при делении на 2 и на 5 интервалов представлены на рис. 1 и 2.

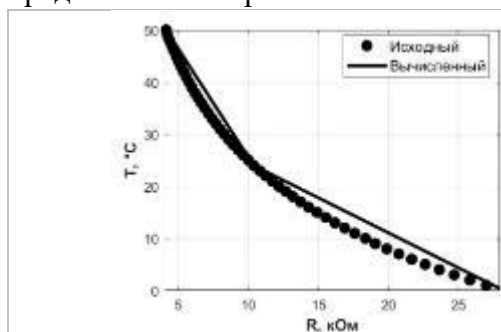


Рис. 1. График кусочно-линейной аппроксимации при делении на 2 интервала

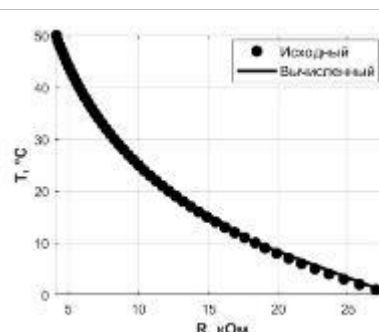


Рис. 2. График кусочно-линейной аппроксимации при делении на 5 интервалов

2. Аппроксимация методом наименьших квадратов

Аппроксимация методом наименьших квадратов [1] выполнялась по следующей формуле:

$$T(R) = a \cdot R^3 + b \cdot R^2 + c \cdot R + d ,$$

где $a = -0,00479, b = 0,309106, c = -7,59059, d = 74,7589$. Подставив коэффициенты получили уравнение аппроксимации $T(R) = -0,00479R^3 + 0,309106R^2 - 7,59059 \cdot R + 74,7589$, график которого представлен на рис.3.

3. Аппроксимация β -формулой

Аппроксимация β -формулой [2] проводилась по формуле:

$$T(R) = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)},$$

где $B = 3435, T_0 = 298,15 \text{ К}, R_0 = 10 \text{ кОм}$

После подстановки констант уравнение принимает следующий вид:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{298,15} + \frac{1}{3435} \cdot \ln\left(\frac{R}{10}\right)}$$

График аппроксимации β -формулой представлен на рис.4.

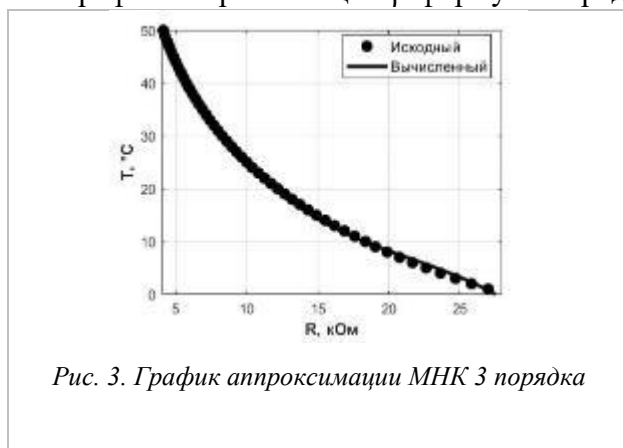


Рис. 3. График аппроксимации МНК 3 порядка

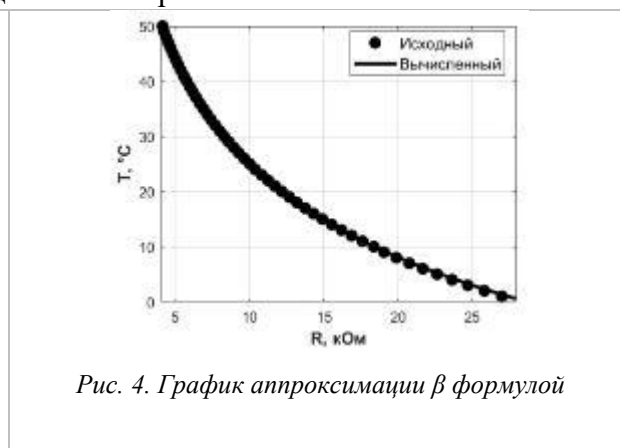


Рис. 4. График аппроксимации β формулой

4. Сравнение методов

Графики абсолютной погрешности для каждого из методов представлены на рис.5. Максимальная погрешность кусочно-линейной аппроксимации при делении на 2 интервала превышает максимальное значение погрешности аппроксимации МНК по модулю минимум в два раза, поэтому исключим данный метод из дальнейшего анализа и будем рассматривать графики, представленные на рис.6.

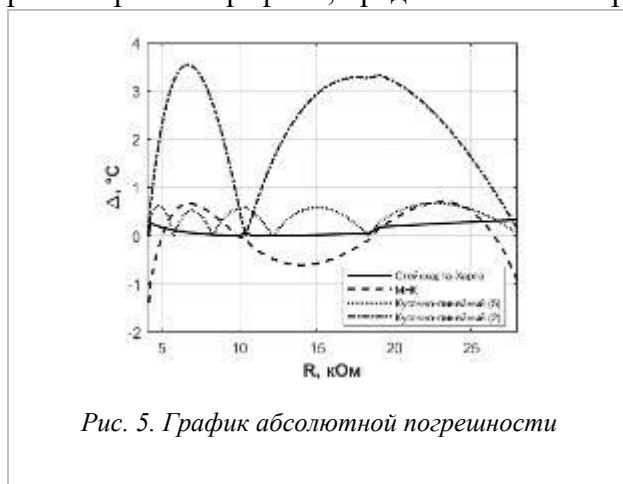


Рис. 5. График абсолютной погрешности

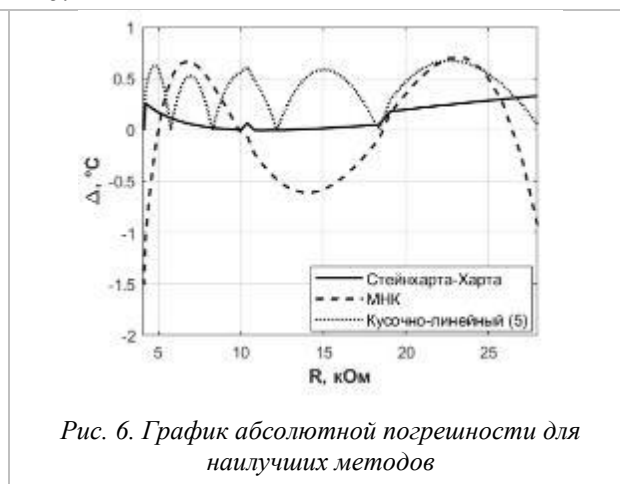


Рис. 6. График абсолютной погрешности для наилучших методов

Рассчитаем интервальную оценку погрешности для каждого представленного метода [3] на основе распределения Стьюдента. Параметры выборки $n = 50$, $P_d = 0,95$, $t_p = 2,009$.

Для аппроксимации методом наименьших квадратов: $m_\Delta = 0,016$ °C, $\sigma_\Delta = 0,55$ °C, тогда $\Delta T = 0,016 \pm 1,1$ °C.

Для аппроксимации методом линейно-кусочной аппроксимации (5 интервалов): $m_\Delta = 0,32$ °C, $\sigma_\Delta = 0,19$ °C, тогда $\Delta T = 0,32 \pm 0,39$ °C.

Для аппроксимации β формула: $m_\Delta = 0,1$ °C, $\sigma_\Delta = 0,2$ °C, тогда $\Delta T = 0,1 \pm 0,2$ °C.

5. Результаты эксперимента и вывод

С помощью мультиметра АРРА-30 измерили сопротивление термистора при комнатной температуре $R = 9,81 \pm 0,11$ кОм, что соответствует температуре $T = 25,5 \pm 0,29$ °C. Расчетные результаты аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№	Методы	Результаты, °C	Погрешность, °C
1	β -формула	25,3	$0,1 \pm 0,2$
2	МНК	25,5	$0,016 \pm 1,1$
3	Кусочно-линейная (5 интервалов)	25,9	$0,32 \pm 0,39$

Исходя из результатов эксперимента наименьшую погрешность $\Delta T = 0,1 \pm 0,2$ °C имеет метод аппроксимации β -формулой. Данная погрешность является методологической и должна учитываться при расчете полной погрешности измерительного канала при использовании рассматриваемого датчика.

Список литературы

1. Карабанов И. А., Романцова Н. В. Описание и анализ сигналов в информационно-измерительных системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 60 с.
2. Зотов В. Принципы построения систем температурного контроля на NTC-термисторах компании Ерсос // Компоненты и технологии. – 2007. – №. 71. – С. 32-38.
3. Садовский Г. А. Теоретические основы информационно-измерительной техники: учеб. пособие для вузов / Садовский Г. А. - М. : Высшая школа, 2008. - 477 с.

БЕСПРОВОДНАЯ КОМПАКТНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

ФАМ ЛЕ ЛОНГ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В данной статье представлена структура компактной беспроводной компактная информационно-измерительная система (КИИС) для оценки динамики движений человека, работающей путем изменения положения точек измерения на теле. Предлагается модульная архитектура, включающая распределенные инерциальные датчики, каналы передачи данных и адаптивные алгоритмы обработки сигналов. Рассмотрены методы оценки неопределенности измерений, основанные на концепции динамических портретов человека.

Ключевые слова: беспроводная информационно-измерительная система, инерциальные датчики, кинематический портрет человека, вейвлет-преобразование, неопределённость измерений.

Введение

Носимые инерциальные измерительные модули (IMU) становятся все более популярными для анализа движений человека в медицине, спорте и эргономике. В отличие от оптических систем захвата движений, IMU позволяют проводить измерения вне лабораторных условий, но их практическое применение затруднено из-за несоответствия в размещении датчиков на теле. Изменение положения датчика приводит к искажению формы сигнала и снижает воспроизводимость результатов. В этой связи крайне важно разработать систему измерений, которая обеспечивает надежность оценок с приемлемыми отклонениями в точках сопряжения. В данной статье основное внимание уделяется демонстрации структуры и выбору методов обработки для компактной беспроводной системы, ориентированной на изменение точек измерения.

Концепция кинематического портрета как основа метрологического обеспечения

Для количественного описания двигательных функций используется концепция «кинематический портрет человека» (КПЧ) – набора измеримых характеристик движения в ключевых анатомических точках (углы суставов, линейные и угловые скорости, длительность фазы шага). Рабочий КПЧ (РКПЧ), содержащий «коридоры нормы» и критические пороги отклонений с учётом пола, возраста, роста и массы тела, позволяет осуществлять сравнение, сигнализацию, прогнозирование и адаптацию к состоянию пациента [1, 2].

Экспериментальные исследования кинематики нижних конечностей показали, что наиболее полезными параметрами являются временные параметры фаз действия при ходьбе (отрыв пятки, перенос веса назад, перенос веса вперед, постановка стопы) и их стандартные отклонения [3]. В табл. 1 приведены типичные диапазоны и требования к точности измерений.

Архитектура измерительной системы и состав датчиков

Разрабатываемая система строится по модульному принципу и включает в себя:

- **Периферийный уровень** – от одного до восьми беспроводных IMU-модулей (акселерометр $\pm 8 \dots \pm 16$ g, гироскоп $\pm 1000^\circ/\text{с}$, частота опроса 200–400 Гц).
- **Канал передачи данных** – Bluetooth 5.2 или Wi-Fi. Передача по протоколу TCP/IP с реализацией сервера на ПК обеспечивает частоту дискретизации до 333 Гц для двух клиентов, что удовлетворяет требованиям теоремы Котельникова для сигналов ходьбы (максимальная информативная частота ~ 30 Гц) [4].
- **Приёмная базовая станция** – на базе микроконтроллера ESP32.
- **Программное обеспечение** – модули фильтрации, компенсации дрейфа, расчёта ориентации, извлечения параметров и сравнения с РКПЧ.

Таблица 1

Диапазон и точность измерения кинематических параметров

Параметр	Линейное ускорение	Угловая скорость	Угол сгибания колена	Длительность цикла ходьбы
Диапазон	± 50 м/с ²	± 1200 °/с	0–140°	0,5–2 с
Требуемая точность	0,02 м/с ²	0,5 °/с	0,5°	10 мс
Варианты применения	Анализ ударных нагрузок при беге	Оценка амплитуды вращения в суставах	Мониторинг восстановления после эндопротезирования	Диагностика брадикинезии

Одной из ключевых особенностей является возможность изменения количества и расположения датчиков без перенастройки всей системы. Для этого в программное обеспечение интегрирован конфигурационный файл, в котором пользователь указывает, какой датчик установлен на какой части тела, а алгоритм автоматически переключает модель обработки. Такая гибкость достигается за счет предварительной анатомической корректировки: после фиксации датчиков испытуемый сохраняет статическую (вертикальную) позу, и рассчитывается матрица вращения между осями датчиков и анатомическими осями сегмента тела.

На рис. 1 представлена структурная схема разрабатываемой КИИС.

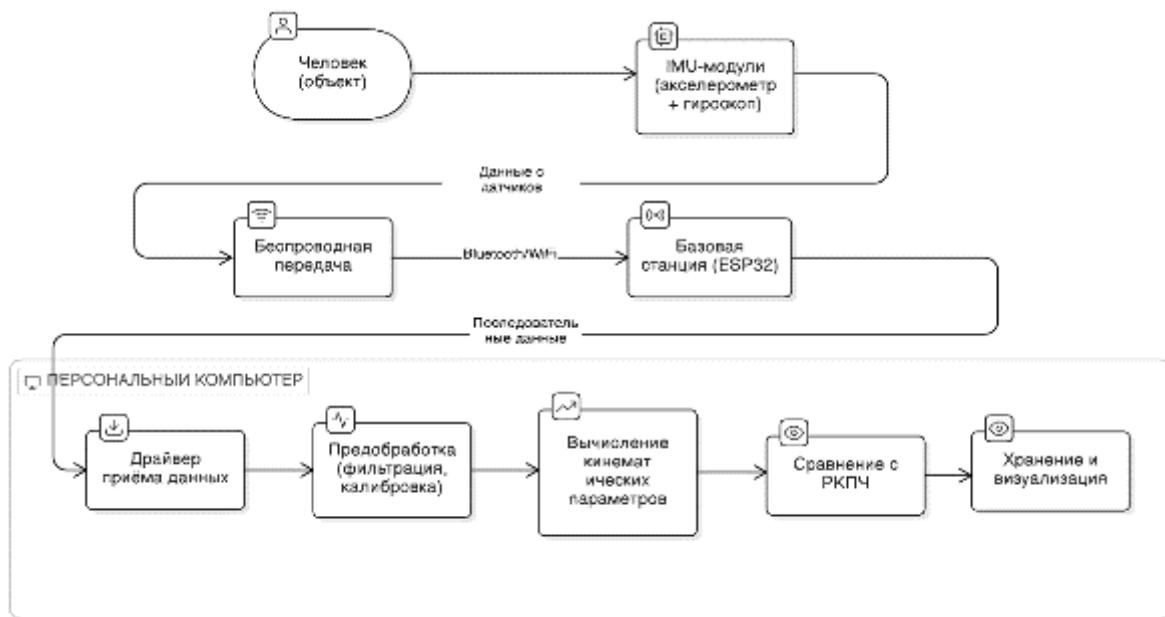


Рис. 1. Структурная схема беспроводной КИИС для оценки кинематики движений человека

Методы обработки сигналов и адаптация к вариации точек измерений

Процесс обработки сигнала включает в себя несколько последовательных этапов: коррекция нуля, калибровка статического ускорения, фильтрация (полосно-пропускающий фильтр Баттерворта) и восстановление направления (расширенный фильтр Калмана или фильтр Маджвика).

При сравнении различных методов фильтрации сигналов акселерометра для задачи выделения фаз шага установлено, что дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) с вейвлетом Добеши 8-го и 6-го порядка обеспечивает наименьшую погрешность определения моментов пересечения сигнала с заданным уровнем. Погрешность составляет: для первого момента пересечения – не более 2,1%, для второго–четвёртого – не более 1%, для пятого – не более 7,1% [5, 6]. Применение цифровых фильтров нижних частот (Баттерворта, Чебышева, Бесселя) или оконного преобразования Фурье (преобразования Габора) приводит к смещению сигнала и увеличению погрешности, особенно при низких отношениях сигнал/шум.

Для компенсации изменений положения датчика на теле система использует двухэтапный подход: краткосрочную адаптацию (анатомическая калибровка на основе статической позы) и долгосрочную адаптацию с использованием методов машинного обучения (сверточные нейронные сети). Эксперименты показали, что такая конструкция позволяет точно определять фазы ходьбы даже при смещении датчика стопы в пределах допустимого диапазона.

Учёт неопределённости результатов и верификация

Авторами [7] проведена оценка суммарной погрешности измерительного канала: для акселерометра она составляет 3,63%, для гироскопа – 3,26% [7]. Погрешность датирования (из-за разности частот синхронизации модулей) при тактовой частоте 80 МГц не превышает 0,00000125% и может не учитываться. Расширенная неопределённость (>2) угловых измерений в сагиттальной плоскости составляет не более $3,2^\circ$ при ходьбе и $2,5^\circ$ при изолированных движениях.

Согласно рекомендациям *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, все источники неопределённости результатов измерений подразделяются на следующие категории: аппаратные (шумы квантования, нелинейность, температурный дрейф), методические (погрешности фильтрации, интегрирования, неточность модели тела) и биологические (вариабельность шага). Поэтому при проектировании компактной ИИС в дальнейшем будет проведен анализ неопределенностей результатов измерений, что позволит определить степень достоверности результатов измерений.

Сравнительный анализ с известными решениями

В табл. 2 приведено сравнение разрабатываемой системы с тремя типичными решениями. Главным преимуществом предлагаемой КИИС является поддержка произвольной вариации измерительных точек при сохранении приемлемой точности ($\approx 3^\circ$) и невысокой стоимости (< 800 €).

Таблица 2

Сравнение с известными системами

Система	Стоимость	Вариация точек	Точность углов	Открытость	Автономность, ч
Xsens MVN	Высокая (>30 тыс.€)	Штатная (фиксированные места)	$\sim 1-2^\circ$	Нет	6–8
Noraxon Ultium	Очень высокая	Фиксированные	$\sim 1-2^\circ$	Нет	10
OpenIMU (DIY)	Низкая (<500 €)	Не предусмотрена	$\sim 4-5^\circ$	Да	4
Предлагаемая КИИС	Низкая (ориентир <800 €)	Широкая (любое размещение)	$\sim 3^\circ$	Да	8–12

Заключение

В работе обоснована структура компактной беспроводной информационно-измерительной системы для оценки кинематики движений человека с возможностью изменения расположения датчиков. Выбраны оптимальные диапазоны измерений и частоты дискретизации. Предложена модульная архитектура на 1–8 IMU-сенсоров с адаптацией к положению датчиков на основе анатомической калибровки. Экспериментально подтверждено, что использование дискретного вейвлет-преобразования позволяет повысить точность определения моментов пересечения сигнала с заданным уровнем по сравнению с классическими фильтрами. Разработанная система прошла апробацию при контроле восстановления нейрохирургических пациентов и анализе

тренировочного процесса спортсменов, что подтверждает её метрологическую пригодность для клинических и спортивных задач.

Список литературы

1. Tsareva A.V., Ivanova T.S., Alekseev V.V. Applications of Discrete Wavelet Transformation for Analysis of Informative Signals of Person's Kinematic Portrait // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – P. 713–715.
2. Alekseev V.V., Korolev P.G., Olar V.O., Tsareva A.V. Systems design for movement kinematics research. Efficiency criteria // 2017 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). – 2017. – P. 251–253.
3. Царёва А.В., Романцова Н.В., Журбило П.Г. Достоверность алгоритма идентификации фаз шага // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2020. – P. 913–916.
4. Царёва А.В., Курочкин А.Ю., Алексеев В.В. Информационно-измерительная система для исследования кинематики движений нижних конечностей человека и беспроводная передача данных // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 3. – DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.011.
5. Царёва А.В., Алексеев В.В., Пименов Д.В., Токарева И.А. Выбор параметров вейвлет-фильтра в задачах определения характеристик сигнала // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2020. – P. 909–912.
6. Романцова Н.В., Сулоева Е.С., Царёва А.В. Метрологические параметры информационно-измерительных систем для исследования кинематического портрета человека // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1703, 012005.
7. Алексеев В.В., Визгирда А.С., Нефедьев Д.И., Царёва А.В. Измерительные системы для мониторинга состояния человека: цифровые двойники на основе кинематического портрета // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1889, 052029.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕНДРИТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МЕДНЫХ ПЛЁНОК

ШМАТОК Е. В.¹, МУРАТОВА Е. Н.¹, МОШНИКОВ В. А.¹, ВРУБЛЕВСКИЙ И.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия Ю ²Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ микроструктур, полученных электрохимическим осаждением при высоких катодных плотностях тока. Предложена методика количественной оценки параметров пустотной структуры медных дендритных плёнок на основе аппроксимации пор эллипсами равной площади и статистической обработки. Полученные параметры (пористость 0,37, плотность пор 632 мм⁻², распределение по размерам) могут служить основой для прогнозирования транспортных свойств и оптимизации дендритных структур для применения в качестве токосъёмников литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова: медные дендриты, медные покрытия, электрокристаллизация, пористые структуры, токосъёмники, литий-ионные батареи, анализ изображений, распределение размеров пор.

Введение

Медные дендритные структуры, формируемые в условиях электрохимического осаждения при высоких катодных плотностях тока, привлекают всё большее внимание благодаря развитой морфологии, высокой удельной поверхности и возможности использования в качестве токосъёмников литий-ионных аккумуляторов, катализаторов и сенсоров [1–5]. В процессе электрокристаллизации наряду с восстановлением меди протекает параллельная реакция выделения водорода (HER), которая играет роль динамического шаблона, создавая сложную иерархическую систему пор [1–5]. Понимание

количественных характеристик пустотного пространства (размеры пор, их распределение, удельная площадь пустот) необходимо для прогнозирования транспортных свойств и эффективности электродов.

Цель настоящей работы – исследование микроструктуры дендритных медных плёнок, полученных гальваническим осаждением при высокой плотности тока, количественная характеристика их пустотной структуры на основе анализа SEM-изображений с последующей статистической обработкой данных.

Методика эксперимента

Электроосаждение меди проводили на медных пластинах (марка С11000, 99,9% Cu) в электролите состава 0,31 М CuSO₄ + 1,53 М H₂SO₄ при напряжении 3,6 В и катодной плотности тока 20 А/дм² в течение 2,5 часов. Полученные образцы с дендритным слоем толщиной около 200 мкм отмывали дистиллированной водой. Морфологию изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO 10. Для количественного анализа пустотного пространства SEM-изображение (рис. 1,а) преобразовывали в бинарную маску (рис. 1,б), затем разделяли перекрывающиеся поры и аппроксимировали каждую область вписанным эллипсом равной площади (рис. 1,в) [6, 7]. Для каждого эллипса определяли площадь, длину большой и малой осей, угол наклона. Эффективный диаметр поры вычисляли как диаметр круга равной площади:

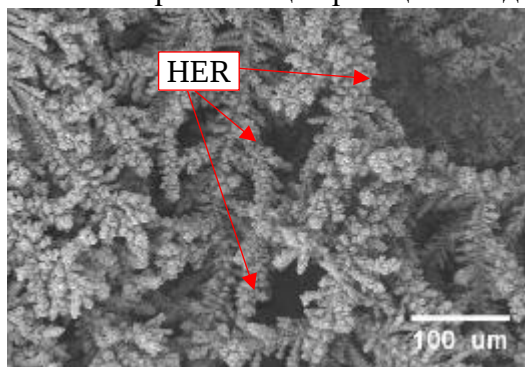
$$d_{eff} = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

где А – площадь эллипса, равная площади поры.

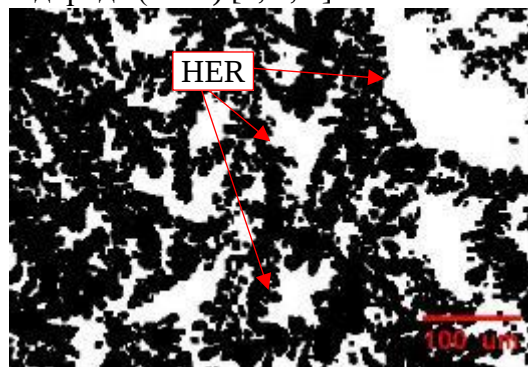
Статистический анализ включал построение функции плотности вероятности (PDF) исходя из измеренной площади эллипсов (рис. 1,г). Сглаживание и аппроксимацию пиков выполняли в программе Origin с использованием модели Gaussian, обеспечивающей приемлемое качество подгонки ($R^2 = 0.95$).

Результаты и их обсуждение

Полученные дендритные структуры характеризуются развитой иерархической системой пустот. Плотность пор, рассчитанная по карте вписанных эллипсов, составила 632 пор/мм². Общая пористость (доля белых пикселей на бинарном изображении) равна 0.37, что свидетельствует о значительной доле пустотного пространства, обусловленного параллельно протекающей реакцией выделения водорода (HER) [3, 8, 9].



(а)



(б)

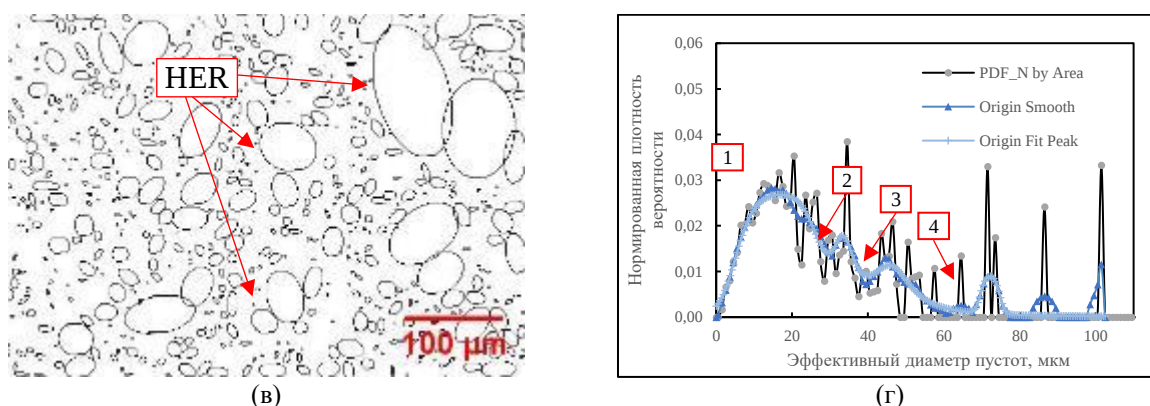


Рисунок 1. Эталонное изображение и результаты обработки: а – изображение медных дендритов, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа; б – бинарная маска; в – карта вписанных эллипсов в пустотном пространстве бинарной маски.

Распределение по площади пустот (рис. 1,г) даёт информацию о вкладе различных фракций в общий объём пор. В результате деконволюции, выявлено шесть пиков, четыре из которых, обладая наибольшими долями площади, имеют параметры, представленные в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты деконволюции

Пик	Эффективный диаметр поры d_{eff}^{max} , мкм	Доля площади	Ширина пика на полувысоте, мкм	Среднеквадратичное отклонение σ , мкм
1	16.0	0.5	21.0	9.1
2	33.0	0.2	8.0	3.2
3	46.0	0.2	13.0	5.5
4	72.0	0.1	5.0	2.2

Наибольший вклад в суммарную площадь вносят поры с эффективным диаметром около 16 мкм (пик 1). Поры, соответствующие пикам 2–4, имеют диаметр ≥ 30 мкм. Механизм образования таких пор связан с коалесценцией пузырей водорода, длительным блокированием поверхности во время электролиза и формированием каналов, пронизывающих дендритный слой насквозь.

Анализ полученного распределения демонстрирует иерархический характер пористости: многочисленные мелкие поры обеспечивают высокую удельную поверхность, в то время как крупные сквозные каналы создают пути для эффективного массопереноса электролита [3, 8-10].

Заключение

Предложен метод количественного анализа пустотной структуры медных дендритных плёнок на основе аппроксимации пор эллипсами равной площади и статистической обработки. Установлено, что при электрокристаллизации при 20 А/дм² формируется четырёхуровневая система пор по площади. Полученные параметры (пористость 0,37, плотность пор 632 мм⁻², распределение по размерам) могут служить основой для прогнозирования транспортных свойств и оптимизации дендритных структур для применения в качестве токосъёмников литий-ионных аккумуляторов. Предложенный метод является быстрой и экономически эффективной альтернативой сложным физическим методам на этапе предварительного скрининга образцов.

Список литературы

1. Younus, H.A., Al Hinai, M., Al Abri, M. and Al Hajri, R. (2024) Copper-Promoted Growth of Hierarchical Cu–Co–Ni Alloys on Copper Nanodendrites for Enhanced Hydrogen Evolution in a Wide pH Range. *International Journal of Hydrogen Energy*, 92, 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.139>
2. Dixon, E.M., Curtis, N.S., Nagle, L.C. and Rohan, J.F. (2025) Electrochemical Fabrication and Characterisation of Nanoporous Copper from CuZn Alloy Precursors at Macro and Microscale Electrode Arrays. *Electrochimica Acta*, 542, 147487. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147487>
3. Lu, W., Peng, X., Guo, F., Yang, B., Song, K., Zhu, Q. and Liu, H. (2025) Fabrication of Bilayer High-Strength Nanoporous Copper Current Collector via Electrodeposition-Dealloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 1044, 184309. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184309>
4. Liang, Y., Wei, T., Yin, G. and Huang, D. (2025) Design of a Lithiophilic Ag-3D-Cu Electrode and Its Electrochemical Performance. *Energy Storage Science and Technology*, 14, 515-524. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0758>
5. Wang, J., Zhou, T., Li, Y., Luo, Z., Liao, X., Wang, X. and Pan, J. (2025) Growing Mulberry-Like Copper on Copper Current Collector for Stable Lithium Metal Battery Anodes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 680, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.10.200>
6. Teague, M.R. (1980) Image Analysis via the General Theory of Moments. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 920-930. <https://doi.org/10.1364/JOSA.70.000920>
7. Severini, T.A. (2005) *Elements of Distribution Theory*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610547>
8. Colliard-Granero, A., Ranieri, S., Bazylak, A., Morawietz, T., Friedrich, K.A., Jankovic, J., Malek, K., Eikerling, M. and Eslamibidgoli, M. (2025) UTILE-Pore: Deep Learning-Enabled 3D Analysis of Porous Materials in Polymer Electrolyte Membrane-Based Energy Devices. *Journal of the Electrochemical Society*, 172, 034506. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/adb9b0>
9. Dzierbinski, A., Schwan, M. and Milow, B. (2025) Characterization of Biopolymer-Based Porous Carbon as Electrode Material in Battery Applications. *Advanced Battery Power Conference 2025*, Aachen, Germany, April 2025.
10. Shmatok Y., Muratova E., Vrublevsky I., Moshnikov V., Synthesis and characterization of copper dendritic structures obtained by electrocrystallization at high current density, *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2026 (In press)

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ГРАВИТАЦИОННОЕ И МАГНИТНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМА

БЕРЕЗНИКОВА Н.А.¹, ГОЛУБЕВА Е.Н.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Аннотация. Красные шламы – крупнотоннажный отход алюминиевой промышленности, накопление которого создает серьезные экологические риски и влечет безвозвратные потери стратегических металлов. Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы является механическое обогащение шламов, позволяющее на ранних стадиях разделить их на фракции и существенно повысить рентабельность последующей гидрометаллургической переработки. Рассмотрены гравитационные и магнитные методы обогащения красных шламов, положенные в основу комплексной безотходной технологии. Показано, что предложенная последовательность операций обеспечивает эффективное разделение шламов на железный концентрат, глиноземо-кремнеземные продукты и концентрат редкоземельных металлов, создавая основу для замкнутого цикла переработки с минимальным выходом вторичных отходов и высокой экономической эффективностью.

Ключевые слова: красные шламы, гравитационное обогащение, центробежная сепарация, магнитная сепарация, редкоземельные металлы, безотходная технология.

Введение

Красные шламы – твердые отходы щелочной обработки бокситов по методу Байера – являются самым многотоннажным отходом алюминиевого производства. Ежегодно в мире образуется около 180 млн т красных шламов, а суммарный объем накопленных отходов превышает 4 млрд т. Только в России размещено свыше 700 млн т красных шламов. Высокая щелочность (рН 10–13), присутствие подвижных форм тяжелых металлов и мелкодисперсное состояние превращают шламохранилища в потенциальные источники загрязнения подземных вод и атмосферного воздуха. В то же время красные шламы содержат значительные количества ценных компонентов: 30–60% Fe_2O_3 , 10–20% Al_2O_3 , 2–15% TiO_2 , а также микропримеси Sc, Ga, Y, La, Ce и других редкоземельных металлов. Таким образом, проблема носит двойственный характер: накопление шламов наносит экологический ущерб, а их хранение без извлечения полезных составляющих оборачивается экономическими потерями.

Существующие пиро- и гидрометаллургические способы переработки красных шламов, как правило, дороги, энергоемки и сопровождаются образованием вторичных отходов. Кардинально повысить технико-экономические показатели переработки позволяет введение стадии предварительного механического обогащения, в первую очередь гравитационной (в частности, центробежной) и магнитной сепарации. Именно эти операции, не требующие применения агрессивных реагентов и высоких температур, дают возможность уже на начальном этапе разделить шламы на фракции, каждая из которых затем перерабатывается наиболее рациональным способом. Цель настоящей работы – рассмотреть гравитационный и магнитный этапы комплексной технологии переработки красных шламов, обобщить их технические параметры и показать их роль в формировании рентабельного безотходного производства.

Характеристика красных шламов как объекта обогащения

Красные шламы представляют собой полидисперсный материал, более 90% частиц которого имеют размер менее 75 мкм, а средняя крупность составляет 12–17 мкм. Минералогический состав включает гематит Fe_2O_3 , гетит FeOOH , гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$, бёмит AlOOH , анатаз и рутил TiO_2 , кварц SiO_2 , кальцит CaCO_3 , а также алюмосиликаты натрия и кальция. Плотность основных рудных минералов (гематита, ильменита, монацита) заметно превышает плотность породообразующих фаз, что создает предпосылки для гравитационного разделения. Кроме того, железосодержащие минералы обладают магнитными свойствами, тогда как алюмосиликатная матрица практически немагнитна. Эти различия и используются в предлагаемой схеме обогащения.

Важным подготовительным этапом является доведение материала до крупности, обеспечивающей достаточное раскрытие минеральных сростков. Согласно разработанной технологии, исходные шламы после сушки подвергают грохочению, выделяя подрешетный продукт с размером частиц менее 1,5 мм; надрешетный материал дробят и измельчают до той же крупности. Такой относительно неглубокий помол, с одной стороны, вскрывает агрегаты частиц, а с другой – позволяет избежать переизмельчения, которое ухудшило бы показатели последующей сепарации.

Гравитационное обогащение в технологии переработки

Ключевым элементом гравитационного передела является центробежная сепарация. Центробежные сепараторы – простое и энергоэффективное оборудование, в котором разделение частиц происходит под действием центробежных сил, сил тяжести и

гидродинамического напора потока пульпы. Благодаря разнице в плотности минералов тяжелая фракция, обогащенная оксидами железа, титана и редкоземельными минералами, концентрируется вблизи оси аппарата, тогда как более легкие алюмосиликатные частицы выносятся к периферии. Применение центробежных сепараторов на одном из уральских заводов позволило снизить влажность шламов с 50% до 12% и одновременно сконцентрировать железосодержащие минералы.

В результате центробежной сепарации формируются два основных продукта:

- тяжелая металлосодержащая фракция, в которой сосредоточены железо, титан, скандий, иттрий и другие редкоземельные элементы;
- легкая фракция, представленная преимущественно глиноземом и кремнеземом.

Дальнейшая судьба этих продуктов принципиально различна. Легкая фракция направляется на флотационное разделение, где получают глиноземный и кремнеземный концентраты – оба пригодны для использования в производстве строительных материалов. Отсутствие в этой фракции значимых количеств тяжелых металлов делает ее экологически безопасной, а попутное извлечение алюминия и кремния вносит вклад в экономику процесса.

Магнитное обогащение: двухэтапная схема

Тяжелая фракция центробежной сепарации подвергается магнитной сепарации, проводимой в два этапа при различных напряженностях магнитного поля.

На первом этапе суспензию обрабатывают в слабом магнитном поле. Эта операция предназначена для выделения сильномагнитного магнетита Fe_3O_4 , который может присутствовать в шламе либо изначально, либо образовываться в результате частичного восстановления гематита в процессе предшествующих технологических операций. Выделенный магнетитовый концентрат представляет собой высококачественное железорудное сырье.

Хвосты первой стадии, содержащие слабомагнитные минералы, направляют на вторую стадию – сильномагнитную сепарацию с напряженностью поля более 6500 Гаусс. Именно в этом режиме происходит отделение гематита, ильменита, монацита и других слабомагнитных фаз, несущих основную массу железа, титана и редкоземельных элементов. Полученный слабомагнитный концентрат служит исходным сырьем для последующего гидрометаллургического извлечения скандия, иттрия, лантаноидов, а также остаточного железа и титана.

Такая двухэтапная схема позволяет не только повысить суммарное извлечение железа в магнитные продукты, но и отделить редкоземельную составляющую от основной железной массы, что существенно упрощает дальнейшую гидрометаллургическую обработку и снижает расход реагентов. В частности, появляется возможность селективного выщелачивания скандия и редкоземельных элементов из слабомагнитного концентрата с применением нетоксичных реагентов на основе тиомочевина (например, Jin Chan), демонстрирующих высокую селективность и экологическую безопасность.

Технико-экономические преимущества метода

Предложенная комбинация гравитационного и магнитного обогащения обладает рядом существенных преимуществ перед прямым гидрометаллургическим или пирометаллургическим переделом исходных шламов.

Во-первых, она обеспечивает комплексное разделение красных шламов на три продуктовых потока: глиноземно-кремнеземную легкую фракцию, сильномагнитный железный концентрат и слабомагнитный концентрат редких и цветных металлов.

Во-вторых, предварительная концентрация целевых компонентов в относительно небольших объемах фракций резко сокращает массу материала, поступающего на дорогостоящую гидрометаллургическую переработку, и, соответственно, уменьшает потребление кислот, щелочей и других реагентов.

В-третьих, оборудование для центробежной и магнитной сепарации – центробежные сепараторы и электромагнитные сепараторы – является серийным, хорошо зарекомендовавшим себя в горно-обогатительной практике и не требует уникальных инженерных решений. Капитальные и эксплуатационные затраты на эти операции значительно ниже, чем на пирометаллургические процессы, протекающие при температурах 1200–1500 °С.

Наконец, максимальное разделение шламов на фракции создает предпосылки для организации безотходного производства, когда все минеральные составляющие находят полезное применение: железо и редкие металлы возвращаются в промышленный оборот, а алюмосиликатная часть используется для выпуска строительных материалов (цементов, геополимеров, кирпича) или для рекультивации нарушенных земель.

Таким образом, гравитационное и магнитное обогащение выступает не просто вспомогательной операцией, а системообразующим элементом рентабельной и экологически безопасной технологии утилизации красных шламов.

Заключение

Гравитационное и магнитное обогащение являются ключевыми стадиями перспективной комплексной технологии переработки красных шламов. Последовательное применение центробежной сепарации, двухэтапной магнитной сепарации в слабом и сильном полях и флотационного разделения легкой фракции позволяет уже на начальном этапе разделить отход на товарные продукты: железный концентрат, концентрат редкоземельных металлов, глинозем и кремнезем. Такое разделение минимизирует объем материала, направляемого на наиболее затратные гидрометаллургические операции, и создает основу для создания безотходного производства, в котором все компоненты шламов используются с максимальной экономической выгодой. Использование простого и надежного обогатительного оборудования делает технологию доступной для внедрения на действующих глиноземных предприятиях, способствуя снижению экологической нагрузки и возвращению стратегических металлов в хозяйственный оборот.

Список литературы

1. Raj R., Yadav B., Yadav J.S., Kumar S. Red mud utilisation for sustainable construction and soil improvement: a comprehensive review // *Discover Sustainability*. – 2024. – Vol. 5. – Article 398.
2. Samal S. Utilization of Red Mud as a Source for Metal Ions—A Review // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – Article 2211.
3. Sutar H., Mishra S.C., Sahoo S.K., et al. Progress of Red Mud Utilization: An Overview // *American Chemical Science Journal*. – 2014. – Vol. 4, № 3. – P. 255–279.
4. Vuković S., et al. A review of the red mud utilization possibilities // *Ovidius University Annals of Chemistry*. – 2024. – Vol. 35, № 2. – P. 165–173.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СППР УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ НМУ

ВАРЬЯНОВ А.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В статье представлены результаты разработки имитационной модели системы поддержки принятия решений (СППР) для управления печами обжига углеграфитового производства в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Модель базируется на методике рассеивания загрязняющих веществ и адаптирована для индикаторного вещества бенз(а)пирена. Программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотек NumPy, Pandas и веб-фреймворка Dash. Разработан прототип автоматизированного рабочего места оператора, обеспечивающий визуализацию полей концентраций, расчёт эколого-экономического риска и формирование рекомендаций по выбору оптимальной стадии НМУ.

Ключевые слова: имитационное моделирование, СППР, неблагоприятные метеорологические условия, печи обжига, бенз(а)пирен, рассеивание выбросов, многомерная матрица решений.

Введение

В современной экологической политике России, направленной на защиту атмосферного воздуха, прослеживается переход от запретительных подходов к управлению, основанному на оценке рисков. Выполнение задач федеральной программы

«Чистый воздух» и ужесточение экологических норм побуждают промышленные предприятия к принятию быстрых и аргументированных мер в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) [1]. Тем не менее, действующая система реагирования на прогнозы Росгидромета не принимает во внимание локальные атмосферные особенности конкретных производственных территорий. Это приводит к задержкам в принятии мер, что может повлечь превышение предельно допустимых концентраций (ПДК), или к излишним действиям, оборачивающимся неоправданными финансовыми убытками.

Для Новосибирского филиала ООО «Эл 6», данная проблема имеет особую остроту. Основными источниками выбросов выступают обжиговые печи Riedhammer. В качестве приоритетного загрязняющего вещества для мониторинга выбран бенз(а)пирен, характеризующийся трудностью рассеивания и повышенной восприимчивостью к метеорологическим факторам.

Основной задачей проведенного исследования является создание модели системы поддержки принятия решений (СППР), которая позволит выбирать оптимальные режимы снижения выбросов. Этот выбор будет базироваться на данных локального метеомониторинга, с целью минимизации общего эколого-экономического риска.

Методы и инструментарий

Для построения имитационной модели был выбран язык программирования Python версии 3.10. Такое решение обусловлено обширной экосистемой научных библиотек и инструментами для веб-разработки, доступными в Python [2]. Основой вычислительного ядра послужила библиотека NumPy, которая обеспечивает эффективную обработку векторных операций. Структурирование данных осуществлялось с помощью библиотеки Pandas. Визуализация зон распространения загрязняющих веществ и создание интерактивного интерфейса были реализованы на базе фреймворка Dash, используя компоненты Bootstrap.

Модель рассеивания примеси разработана в соответствии с требованиями Приказа Минприроды России № 273 [3]. Для каждого эмиссионного створа были определены ключевые параметры: высота трубы (30 м), диаметр выходного отверстия (1,2 м), скорость истечения газов (12 м/с), температура (150 °С) и производительность выбросов бенз(а)пирена (0,005 г/с). Процесс расчета приземной концентрации включает определение коэффициентов φ_1 , φ_2 m , n , учитывая класс атмосферной устойчивости согласно классификации Пасквилла–Гиффорда [4].

В модель интегрирован модуль, учитывающий специфику климатических условий Новосибирской области. Этот модуль включает анализ розы ветров (преобладающие направления — южное и юго-западное), диапазонные значения скорости ветра для нормальных условий (2-8 м/с), умеренных неблагоприятных метеоусловий (НМУ) (0,5-2,5 м/с) и сильных НМУ (0-1,5 м/с), а также вероятностное распределение классов устойчивости (для сильных НМУ характерен преобладающий класс F).

Предусмотрено пять дискретизированных стадий по сокращению объемов выбросов: 0% (стадия 0), 20%, 40%, 60% и 100% (стадия 4). Для каждой стадии осуществляется расчет коэффициента превышения предельно допустимой концентрации (ПДК), экологического ущерба и производственных потерь. Суммарный риск определяется как сумма экологического ущерба и производственных потерь [5]. Оптимальным вариантом считается стадия, при которой совокупный риск достигает минимального значения.

Результаты

Был создан прототип автоматизированной рабочей станции, реализованный как веб-приложение на платформе Dash (рис. 1). Пользовательский интерфейс состоит из двух ключевых разделов: «Расчёт рассеивания» и «Сравнение режимов». В верхней части окна приложения демонстрируются параметры модели, соответствующие требованиям Приказа № 273.

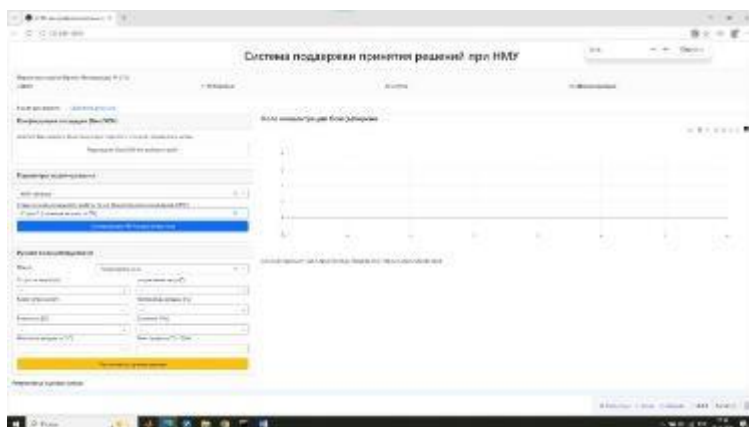


Рис. 1. Общий вид панели СППР

На вкладке «Расчёт рассеивания» оператор выбирает предустановленный сценарий НМУ или вводит метеопараметры вручную, указывает стадию снижения выбросов и запускает расчёт.

Для быстрой настройки предусмотрены пресеты «Штиль/Застой», «Сильный ветер», «Инверсия/Туман» (рис. 2).

Рис. 2. Блок ручного ввода метеоусловий

Результат расчёта визуализируется в виде контурной карты приземных концентраций бенз(а)пирена (рис. 3). Синие оттенки соответствуют концентрациям менее 0,2 ПДК, жёлтые – приближению к ПДК, красные – превышению. На карту нанесены границы промышленной площадки и жилой застройки, а также местоположение источников выбросов.

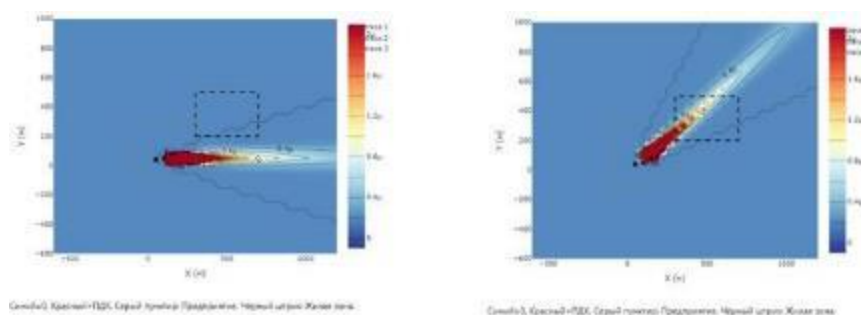


Рис. 3. Поля концентраций бенз(а)пирена для различных метеосценариев

Под картой отображается блок оценки риска (рис. 4), где цвет текста зависит от величины K_{exc} : зелёный – штатный режим ($K_{exc} < 0,8$), оранжевый – риск приближения к ПДК ($0,8 \leq K_{exc} < 1,0$), красный – превышение ПДК ($K_{exc} \geq 1,0$). Система формирует рекомендацию о целесообразности перехода на другую стадию.

Рис. 4. Примеры оценки экологического ущерба и потерь производства

Для обработки неопределённостей, связанных с входными данными, была разработана система многомерных матриц решений, представленная на рис. 5. С применением метода Монте-Карло, включающего 50 итераций моделирования, были проведены оценки влияний по пяти основным категориям факторов: метеорологические условия, технологические процессы, пространственные характеристики, экономические аспекты и инерционные свойства системы, согласно источнику [6]. На базе вычисленного стохастического индекса определяется приоритетность выполнения дальнейших действий. Присваиваются следующие категории: «КРИТИЧЕСКИЙ» (если K_{exc} превышает 1,0 или индекс превосходит 0,7), что требует немедленного перехода к наиболее эффективной стадии; «ПОВЫШЕННЫЙ», предписывающий подготовительные мероприятия для перехода; и «НОРМАЛЬНЫЙ», допускающий продолжение текущей операционной деятельности.

Многомерная матрица решений по реактивному управлению температурой				
Сценарий	Текущие выбросы	Внутренний риск	Внешний риск	Рекомендация
Внеочередной выброс	340 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Уменьшить выбросы при аварийном режиме
Технологический выброс	Средн. 2 300 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Генерация энергии
Производственный выброс	400 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Снизить выбросы
Загрязнение	3 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Защитные мероприятия
Наружный выброс	0 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Уменьшить выбросы
Совокупный выброс	342 т/сут	0,01 руб./ч	0,01 руб./ч	Продолжить работу в текущем режиме

Рис. 5. Вывод многомерной матрицы решений

Для тяжёлых НМУ (скорость ветра 0,5 м/с, класс устойчивости F, температура –10 °С) рассчитаны совокупные риски по стадиям (табл. 1). Оптимальной является стадия 4 (полная остановка) с риском 50 000 руб./ч, что в 10 раз ниже, чем при реактивном управлении по стадии 3 (544 000 руб./ч) согласно формальному предупреждению Росгидромета.

Таблица 1

Результаты расчёта для сценария тяжёлых НМУ

Стадия	Снижение выбросов	K_{ex}	Ущерб, руб./ч.	Потери, руб./ч.	Совокупный риск, руб./ч.
0	0%	8,5	816 000	0	816 000
1	20%	6,8	729 000	10 000	739 000
2	40%	5,1	632 000	20 000	652 000
3	60%	3,4	514 000	30 000	544 000
4	100%	0	0	50 000	50 000

Разработана имитационная модель СППР управления печами обжига при НМУ, включающая: модель рассеивания по методике Приказа № 273, генератор метеосценариев на основе климатических данных Новосибирской области, алгоритм дискретного выбора оптимальной стадии снижения выбросов, прототип АРМ оператора с визуализацией полей концентраций и блок многомерной матрицы решений. Вычислительные эксперименты подтвердили снижение совокупного риска в 10 раз по сравнению с реактивным управлением. Результаты могут быть тиражированы на другие предприятия, имеющие аналогичные источники выбросов, чувствительные к метеоусловиям.

Список литературы

1. Федеральный проект «Чистый воздух» [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : официальный сайт. – Москва, [б. г.]. – Обновляется в течение суток. – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/federalnyy_proekt_chistyy_vozduk h/ (дата обращения: 01.05.2026).
2. Python 3.10 documentation [Electronic resource] // Python Software Foundation : [site]. – USA. – Updated continuously. – URL: <https://docs.python.org/3.10/download.html> (дата обращения: 01.05.2026).
3. Приказ Минприроды России от 24.02.2021 № 273 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля» (ред. от 2025) [Электронный ресурс] // Контур.Норматив : справочно-правовая система. – Екатеринбург. – Действует до 01.09.2028. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310516> (дата обращения: 01.05.2026).
4. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с. [Электронный ресурс]. – URL: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-090588.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
5. Грибановская, С. В. Эколого-экономические риски предприятия природопользования / С. В. Грибановская, А. А. Курочкина, А. Ю. Панова. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2021. [Электронный ресурс]. – URL: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/rid_0cc9f61b7d33443481eda71a569927e0.pdf (дата обращения: 01.05.2026).
6. Тунакова, Ю. А. Области применения моделей для расчета распределения примесей в приземном слое атмосферного воздуха [Электронный ресурс] / Ю. А. Тунакова, И. Г. Григорьева, Р. А. Шагидуллина.

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Мумджян К.А.^{1,2}, ПЕТРОВА Н.Е.^{1,3}, ПРИЩЕНКО А.В.^{1,4}

IAO «НПО Спецматериалов», 2 СПбПУ им. Петра Великого, 3СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
им. В.И Ульянова (Ленина), 4БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Аннотация. В данной статье рассматриваются актуальные методы разработки систем пожарной сигнализации, основанные на применении технологий Интернета вещей. Проводится анализ преимуществ интеграции умных сенсоров, современных сетевых протоколов и аналитических инструментов для повышения эффективности обнаружения пожаров и сокращения времени отклика. Особое внимание уделяется аспектам обеспечения отказоустойчивости, а также вопросам интеграции с другими системами комплексной безопасности.

Ключевые слова: пожарная сигнализация, интернет вещей, беспроводные системы

Традиционные системы пожарной сигнализации, функционирующие на основе автономных датчиков дыма и температуры, характеризуются ограниченными возможностями адаптации и аналитической обработки данных. Прогресс в области технологий открывает новые возможности для разработки интеллектуальных распределённых систем мониторинга, что способствует повышению эффективности предотвращения и ликвидации пожаров.

Цель данной работы – исследовать, каким образом IoT-решения способны повысить эффективность систем пожарной сигнализации.

В отличие от традиционных сенсоров, современные устройства обладают способностью к выполнению предварительной обработки данных, они демонстрируют высокую адаптивность к динамическим изменениям условий окружающей среды, что позволяет им функционировать в широком диапазоне параметров, кроме того, эти сенсоры минимизируют количество ложных срабатываний, обеспечивая высокую надежность и достоверность получаемой информации, а также главным преимуществом является то, что данные, полученные с датчиков, передаются в реальном времени.

Интернет вещей охватывает такие области, как преобразование физических параметров в цифровые данные, системы электроснабжения и накопления энергии, управление миллиардами устройств на расстоянии от одного метра до нескольких километров, а также разработка систем и протоколов для передачи информации на максимально возможные дистанции. Важными аспектами являются теория сетей и информации, интернет-протоколы для интернета вещей, а также роль граничной маршрутизации и шлюзов [1].

IoT-решения предоставляют возможность интеграции датчиков в единую сеть с централизованным или децентрализованным управлением. Типичная архитектурная структура таких систем включает следующие ключевые компоненты:

- уровень устройств, которая включает в себя: датчики дыма, датчики температуры, газовые сенсоры, инфракрасные датчики, которые оснащаются микроконтроллерами и средствами беспроводной связи;
- сетевой уровень, включающий беспроводные и проводные протоколы передачи данных, такие как Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT;

- платформенный уровень, включающий в себя облачную или локальную платформу для хранения и обработки данных, а также управления устройствами;
- прикладной уровень, представляющий пользовательские интерфейсы и системы оповещения.

В качестве протоколов связи в IoT-решениях применяются такие технологии, как MQTT, Zigbee, LoRaWAN и NB-IoT.

Все платформы Интернета вещей состоят из нескольких мобильных компонентов самой платформы и аппаратного обеспечения. Наиболее трудоемким процессом построения архитектуры Интернета вещей является управление оборудованием [2].

В отличие от традиционных сенсорных устройств, IoT-платформы способны осуществлять первичную обработку данных, а с помощью встроенных алгоритмов фильтрации, эффективно идентифицируют и устраняют ложные срабатывания, обеспечивая высокую точность и надежность мониторинга.

Они поддерживают передачу данных в режиме реального времени, что критично для приложений, требующих оперативного реагирования на изменения в окружающей среде или состоянии объектов.

В настоящее время существует три основных типа активных систем пожарной безопасности Интернета вещей:

1. интеллектуальная система обнаружения дыма;
2. система мониторинга горючих газов и автоматического отключения;
3. система оповещения о пожаре, основанная на анализе видео.

Рассмотрим более подробно интеллектуальную систему обнаружения дыма.

Принцип работы интеллектуальной системы обнаружения дыма заключается в мониторинге параметров окружающей среды в режиме реального времени с помощью фотоэлектрических /ионных датчиков дыма. Когда концентрация дыма или температура превышают пороговое значение, данные передаются на облачную платформу через шлюз, вызывая звуковую и визуальную сигнализацию и подключая спринклерную систему или оборудование для дымоудаления [3].

Интеллектуальная система обнаружения дыма обеспечивает управление связью с помощью объединения нескольких датчиков и беспроводной сети. Система проста в установке, не требует подключения проводов и имеет более низкую частоту ложных срабатываний, чем традиционные детекторы дыма. Его можно широко использовать в жилых районах, номерах гостиниц, на заводах (раннее предупреждение о пожаре), в центрах обработки данных (зоны, чувствительные к температуре) и в торговых центрах (связанные дымоудаления в густонаселенных районах).

В таблице 1 приведены преимущества внедрения IoT-решений в систему пожарной сигнализации, а также за счет каких элементов это достигается.

Таблица 1

Преимущества внедрения IoT-технологий

Преимущества	Ключевые элементы
Повышение надёжности	1. Резервирование каналов связи 2. Непрерывный мониторинг состояния устройств 3. Автоматическая диагностика и уведомления о неисправностях 4. Распределённая обработка данных 5. Корреляция данных от нескольких датчиков

Сокращение времени реагирования	1. Мгновенная передача сигналов тревоги 2. Автоматическое оповещение служб и персонала 3. Интеграция с BMS (системами управления зданием) 4. Автоматическое включение систем пожаротушения 5. Edge-вычисления (обработка данных на уровне датчиков)
Роль машинного обучения	1. Классификация событий (пожар / ложная тревога) 2. Прогнозирование рисков 3. Анализ больших объёмов данных 4. Оптимизация размещения датчиков
Перспективы развития	1. Развитие 5G и Edge-технологий 2. Интеграция с системами «умного города» 3. Использование цифровых двойников зданий 4. Повышение автономности устройств

Помимо преимуществ у IoT-решений есть свои недостатки. Анализ проблем и ограничений в контексте современных информационных технологий:

1. кибератаки, утечки данных и несанкционированный доступ требуют комплексных мер защиты на всех уровнях информационной инфраструктуры, и все осложняется тем, что традиционные методы безопасности часто не справляются с постоянно меняющимися угрозами;

2. современные информационные системы в значительной степени зависят от сетевой инфраструктуры, в связи с чем системы становятся уязвимыми к различным сбоям и отказам, что может привести к серьезным последствиям для их стабильной работы;

3. высокая стоимость за внедрения современных информационных технологий, затраты на оборудование, программное обеспечение, обучение сотрудников и техническую поддержку;

4. недостаточная унификация стандартов и протоколов в области информационных технологий осложняет обеспечение функциональной совместимости различных программных и аппаратных систем.

Список литературы

1. Кокунин П.А. Введение в Интернет вещей [Электронный ресурс]: учебное пособие / П.А. Кокунин, И.И. Латыпов, Л.С. Латыпова. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 6,42 Мб). – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 147 с. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F_378200975/IOT.pdf.
2. Ибрагимова, А. М. Исследование IoT -решений: типы и характеристики / А. М. Ибрагимова // Техника и технология современных производств : Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 13–14 мая 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 139-142. – EDN BLCBFK.
3. Zhang G., Research on the Application of the Internet of Things in the Field of Fire Safety. Network Security. 2011. V.24, No.3, pp.106-108.
4. Мумджян, К. А. Информационная система для расчета пожарного риска и опасных факторов пожара с применением нейронных сетей / К. А. Мумджян, Е. А. Грязева, А. В. Прищенко // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : Сборник научных статей 6-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок, Курск, 01 декабря 2025 года. Том 4. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2025. – С. 35-39. – EDN TKRYGF.

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ

ПАНОВА Д. В., ПАСТУХОВА И. Р., ХВАЩЕВСКАЯ Я.А.

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

Аннотация. В работе проведена сравнительная оценка фитотоксичности почв, отобранных в зоне влияния полигона твёрдых коммунальных отходов и на территории городского парка. Методом фитотестирования с использованием кресс-салата и редиса в качестве тест-объектов определены всхожесть семян, высота побегов и длина корневой системы проростков на седьмые сутки эксперимента. Гипотеза подтвердилась и установлено, что почва полигона стимулирует прорастание семян и рост надземной части, однако угнетает развитие корней, что свидетельствует о наличии низкой фитотоксичности. Рассчитан индекс токсичности фактора.

Ключевые слова: фитотоксичность, биотестирование, полигон ТКО, фитотестирование, морфометрические показатели, индекс токсичности фактора, санитарно-защитная зона, почвенный покров, фильтрат, экологический мониторинг.

Введение.

Полигоны ТКО – источник загрязнения, способный изменять свойства почв и угнетать живые организмы. Поскольку химический анализ не всегда отражает суммарное воздействие загрязнителей, актуальными становятся биологические методы, в частности фитотестирование – оценка токсичности по реакции растений. Цель настоящей работы – сравнить фитотоксичность почв в зоне влияния полигона ТКО и фонового участка с использованием кресс-салата и редиса в качестве тест-объектов.

1.1. Загрязнение почв в зоне полигонов ТКО

Полигоны ТКО – источники комплексного загрязнения. Загрязнители классифицируются по происхождению (бытовые, промышленные, строительные, медицинские отходы) и химической природе (органические соединения, нефтепродукты, ПАВ, биогенные элементы).

Фильтрат полигона – многокомпонентная смесь, образующаяся при просачивании осадков через толщу отходов. Содержит растворённые органические кислоты, аммиак, хлориды, фенолы, формальдегид, нефтепродукты, соли. Мигрируя в почву, фильтрат изменяет её химический состав и биологическую активность.

1.2. Механизмы токсического действия на растения

Загрязнители поступают в растения корневым (основной) и листовым путями. Ключевой механизм токсичности – окислительный стресс: образование активных форм кислорода (супероксид-анион, перекись водорода, гидроксильный радикал), повреждающих мембраны, белки и ДНК. Также загрязнители подавляют фотосинтез – разрушают хлорофилл, повреждают фотосистему II, ингибируют ферменты цикла Кальвина, нарушают водный обмен.

1.3. Метод фитотестирования

Фитотестирование – метод биодиагностики, основанный на оценке угнетающего или стимулирующего действия субстрата на рост и развитие высших растений по интегральным показателям. Преимущества: интегральная оценка, чувствительность, экономичность,

наглядность. Ограничения: не идентифицирует конкретные загрязнители, требует стандартных условий.

Основные тест-критерии: энергия прорастания, лабораторная всхожесть, длина корня (наиболее чувствительный показатель), длина побега, биомасса. Индекс толерантности (ИТ) рассчитывается как отношение произведения длин корня и побега в опыте к контролю, выраженное в процентах. ИТ < 100% – угнетение, ИТ > 100% – стимуляция.

1.4. Тест-объекты

Редис (Raphanus sativus) – семейство Капустные, семена крупные, быстрый рост, чувствительность к засолению, способность накапливать загрязнители в корнеплоде. *Кресс-салат (Lepidium sativum)* – семейство Капустные, семена мелкие, очень быстрое прорастание, высокая чувствительность к загрязнителям, стандартный тест-объект международных протоколов.

2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты и тест-объекты

Отбор проб производился 17 апреля на двух площадках: городской парк (59.968615, 30.346267, дерново-подзолистая суглинистая почва, контроль) и санитарно-защитная зона полигона ТКО (59.9966, 30.2236, опыт). Тест-объекты: кресс-салат сорта «Жара», редис.

2.2. Отбор и подготовка проб

Отбор – методом «конверта» (квадрат 1×1 м, 5 точечных проб из слоя 10–15 см), объединённых в смешанный образец ~500 г. Почву очищали от камней и мусора, не высушивали для сохранения нативной микрофлоры.

2.3. Схема эксперимента

Две повторности на вариант (один контейнер × 20 семян). Контейнеры со слоем почвы ~5 см. Семена заделывались на глубину 0,5–1 см. Условия: температура 22–24 °С, естественное освещение (~12 ч), полив отстоянной водой равными объёмами, ежедневная ротация. Продолжительность – 7 суток.

2.4. Критерии учёта

Всхожесть (%), средняя высота побега (см), средняя длина главного корня (см), визуальные признаки (окраска, тургор, аномалии). Рассчитывались средние значения, стандартное отклонение, отклонение опыта от контроля (%). Итоговая оценка – по индексу токсичности фактора (ИТФ = длина корня в опыте / длина корня в контроле).

Шкала ИТФ: >1,10 – стимуляция; 0,91–1,10 – норма; 0,71–0,90 – низкая токсичность; 0,50–0,70 – средняя; <0,50 – высокая.

3. Результаты эксперимента и их обработка

Таблица 1

Средние значения морфометрических показателей по повторностям (7-е сутки)

Показатель	Повторность	Кресс-салат, Парк	Кресс-салат, Полигон	Редис, Парк	Редис, Полигон
Число проросших семян, шт	№1	19	19	10	19
	№2	18	20	12	19
Средняя высота побега, см	№1	3,9	5,7	5,2	7,0

	№2	4,2	6,1	5,5	7,4
Средняя длина корня, см	№1	2,7	4,0	3,1	4,4
	№2	3,0	4,3	3,4	4,7

Таблица 2

Обобщённые результаты фитотестирования ($M \pm m$)

Показатель	Кресс-салат (Парк)	Кресс-салат (Полигон)	Редис (Парк)	Редис (Полигон)
Всхожесть, %	70%	100%	35%	67,5%
Средняя высота побега, см	$3,0 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,3$	$5,35 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,3$
Средняя длина корня, см	$3,1 \pm 0,1$	$2,75 \pm 0,2$	$3,85 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,3$
Цвет листьев	Насыщенный темно-зеленый	Светло-зеленый	Насыщенный темно-зеленый	Светло-зеленый
Аномалии развития	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют

Таблица 3

Отклонение опытных показателей относительно контроля и оценка эффекта

Показатель	Кресс-салат: откл. от контроля, %	Характер эффекта	Редис: откл. от контроля, %	Характер эффекта
Всхожесть	+43%	Сильная стимуляция	+93%	Крайне сильная стимуляция
Высота побега	+97%	Сильная стимуляция	+35%	Стимуляция
Длина корня	-11%	Угнетение (фитотоксичность)	-17%	Угнетение (фитотоксичность)

Таблица 4

Итоговая оценка степени фитотоксичности по шкале ИТФ (индекса токсичности фактора)

Вариант	Культура	ИТФ (по длине корня)	Степень токсичности / стимуляции
Почва полигона ТКО	Кресс-салат	$2,75 / 3,1 = 0,89$	IV класс – Низкая токсичность
Почва полигона ТКО	Редис	$3,2 / 3,85 = 0,83$	IV класс – Низкая токсичность

4. Заключение

Проведённое исследование показало, что почва в районе полигона была более токсичная, чем в парке. Почва полигона стимулирует прорастание семян (всхожесть кресс-салата – 100% против 70% в контроле, редиса – 67,5% против 35%) и рост надземной части (побеги выше на 35–97%). При этом корневая система угнетена: длина корня снижена на 11% у кресс-салата и на 17% у редиса. ИТФ составляет 0,89 и 0,83 соответственно (IV класс – низкая токсичность).

Дисбаланс объясняется тем, что биогенные элементы из пищевых отходов (азот, фосфор, калий) стимулируют рост побегов, а растворённые в фильтрате органические кислоты, избыточные соли и продукты неполного разложения создают химически агрессивную среду, угнетая корень. Дополнительным фактором контраста явилось низкое

плодородие парковой почвы (всхожесть 35–70%). Результаты демонстрируют, что длина корня – наиболее информативный показатель фитотоксичности, и ориентация только на высоту побега может приводить к ошибочным выводам об экологическом благополучии среды.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений [Текст]. – Введ. 2011–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
2. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб [Текст]. – Введ. 2019–01–01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 8 с.
3. МР 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности [Текст]. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. – 15 с.
4. Максимова Н. Б. Оценка влияния полигона твердых отходов на загрязнение почвенного покрова прилегающих территорий методом фитоиндикации [Текст] / Н. Б. Максимова, Н. А. Белоусов, Г. Г. Морковкин // География и природопользование Сибири. – Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2023. – Вып. 31. – С. 102–109.
5. Еремченко О. З. Повышение редокс-активности растений как тест-реакция на загрязнение почв [Текст] / О. З. Еремченко, О. А. Четина, И. Е. Шестаков, Я. А. Паршакова // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2019. – № 3. – С. 312–320
6. Воронина Л.П., Поногайбо К.Э. Подход к выбору методов фитотестирования для исследования почв // Агрохимия [Электронный ресурс]: URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?a=Agro2109012Voronina&j=agro&n=9&v=0&y=2021> (дата обращения 04.04.2026)
7. Галактионова Е.В., Сафонов А.И. Детализация метода фитотестирования загрязненных почв по уязвимости апикальных меристем // Вестник Донецкого национального университета. [Электронный ресурс]: URL: <http://dongu-vestnik01.ru/index.php/bdsa/article/view/304> (дата обращения 04.04.2026)

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРИКЛАДНЫХ ОБЛАСТЯХ

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ К ДЕФЕКТАМ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

Беляков М.С.

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

Аннотация. Рассмотрена проблема дефектов обучающей разметки в задачах детекции объектов. Выделены основные типы нарушений: шум классов, неоднозначные категории, пропущенные аннотации и неточные ограничивающие рамки. Выполнен обзор методов, направленных на снижение влияния таких дефектов: bootstrapping, generalized cross entropy, иерархическая классификация, обработка потенциально пропущенных объектов и регрессия рамок с оценкой неопределённости. Показано, что наиболее удобны для практического применения методы, изменяющие целевые метки или функцию потерь без полной перестройки архитектуры детектора.

Ключевые слова: детекция объектов, шумная разметка, bootstrapping, generalized cross entropy, иерархическая классификация, noisy bounding boxes.

Введение

Качество моделей компьютерного зрения существенно зависит от качества обучающей разметки. В задачах детекции объектов ошибка может проявляться не только в неверно

указанном классе, но и в пропущенной рамке, смещённой границе объекта или неоднозначной принадлежности объекта к нескольким визуально близким категориям. Такие дефекты особенно характерны для прикладных наборов данных, где разметка выполняется вручную, а объекты могут быть малыми, частично закрытыми, размытыми или снятыми в сложных условиях.

Стандартное обучение обычно предполагает, что целевая метка и ограничивающая рамка являются истинными. При нарушении этого предположения модель получает противоречивые градиенты: корректное предсказание может штрафиться из-за ошибочной метки, реальный объект без аннотации может рассматриваться как фон, а неточная рамка заставляет регрессионную часть модели подгоняться под субъективную границу. Поэтому актуальны методы, которые не требуют полной очистки датасета, а повышают устойчивость обучения к дефектам данных.

Основные категории дефектов разметки

Дефекты обучающих данных удобно разделить на четыре группы. Первая группа - шум классов, когда объекту назначается неверная категория. Вторая - неоднозначные или иерархически связанные классы, когда разметчик не может надёжно различить близкие подклассы. Третья - пропущенные аннотации: объект присутствует в изображении, но его bounding box отсутствует. Четвёртая - шум координат, при котором класс указан верно, но рамка смещена, слишком широка, слишком узка или описывает только часть объекта.

Для каждой группы нужны разные механизмы. Ошибочные классы удобнее обрабатывать через soft-targets и робастные функции потерь. Неоднозначные классы естественно описываются через иерархию или superclass. Пропущенные рамки требуют осторожной работы с отрицательными примерами, поскольку не каждый unmatched-регион является фоном. Неточные рамки целесообразно обрабатывать через оценку неопределённости или калибровку регрессионного сигнала.

Методы повышения устойчивости

Bootstrapping [1] относится к методам изменения целевой метки. Вместо полного доверия к one-hot-разметке используется смесь исходной метки t и текущего предсказания модели z :

$$\tilde{y} = \beta t + (1 - \beta)z$$

Здесь β задаёт степень доверия к исходной разметке. Если пример размечен ошибочно, модель не обязана полностью подчиняться метке, а частично учитывает собственное согласованное предсказание. В hard-варианте z заменяется на one-hot-вектор класса с максимальной вероятностью, а в soft-варианте используется всё распределение вероятностей. Метод прост для внедрения, но требует аккуратного выбора β , поскольку на ранних этапах обучения собственные предсказания модели могут быть ненадёжны.

Generalized cross entropy (GCE) [2] решает проблему чрезмерной чувствительности cross entropy к шумным меткам. Семейство потерь задаётся выражением:

$$L_q(f_y) = \frac{1 - f_y^q}{q}, \quad 0 < q \leq 1$$

При q стремящемся к нулю функция приближается к cross entropy, а при $q = 1$ - к MAE. Интуиция метода хорошо видна через сравнение градиентов CCE и MAE:

$$\frac{\partial L_{CCE}}{\partial \theta} = -\frac{1}{f_y(x)} \nabla_{\theta} f_y(x), \quad \frac{\partial L_{MAE}}{\partial \theta} = -\nabla_{\theta} f_y(x)$$

Если метка ошибочна, а модель не согласна с ней, значение $f_y(x)$ мало. В CCE множитель $1/f_y(x)$ становится большим и заставляет модель агрессивно подгоняться под шум. MAE, наоборот, не усиливает такие примеры, но из-за этого хуже обучает сложные корректные объекты. GCE занимает промежуточное положение: он ограничивает влияние шумных меток, но сохраняет более сильный обучающий сигнал, чем MAE.

Иерархическая классификация полезна, когда классы имеют естественную таксономию. В hYOLO [3] классификационная ветвь YOLOv8 расширяется несколькими уровнями, соответствующими уровням дерева классов. Модель сначала предсказывает более общий класс, затем уточняет подкласс. Дополнительно вводится hierarchy-aware loss, который штрафует нарушения родительско-дочерних связей. Такой подход не только повышает интерпретируемость, но и уменьшает тяжесть ошибок: путаница между близкими подклассами считается менее критичной, чем ошибка между удалёнными ветвями дерева.

Для пропущенных аннотаций важна идея ослабления ложных отрицательных примеров. В работах по sparse annotations [4] потенциально пропущенные объекты выделяются по высокому objectness и малому пересечению с имеющимися ground truth рамками. В практической реализации такой регион можно не использовать как обычный фон или учитывать его с меньшим весом. Это позволяет не наказывать модель за обнаружение объекта, который действительно присутствует в кадре, но отсутствует в разметке.

Шум ограничивающих рамок можно обрабатывать через регрессию с неопределённостью [5]. Модель предсказывает не только координату x_e , но и log-variance $\alpha = \log \sigma^2$. Для одной координаты используется loss:

$$L_{reg} = \frac{1}{2} e^{-\alpha} (x_g - x_e)^2 + \frac{1}{2} \alpha, \quad \alpha = \log \sigma^2$$

Первая часть уменьшает вклад координатной ошибки при большой неопределённости, а вторая не позволяет бесконечно увеличивать дисперсию. Поэтому метод работает как адаптивное взвешивание bbox-ошибки: сомнительные или неоднозначные границы объекта получают меньший вклад в обучение, но сама неопределённость также штрафует.

Таблица 1

Сравнение рассмотренных подходов

Метод	Тип дефекта	Основная идея	Оценка применимости
Bootstrapping	Ошибочные классы	Смешивание исходной метки и предсказания модели.	Легко реализуется как soft-target; важно не доверять ранним ошибкам.
GCE loss	Шумные метки классов	Промежуточное поведение между CCE и MAE.	Простая замена classification loss; устойчива к шумным меткам.
Иерархическая классификация	Близкие классы и superclass	Предсказания на нескольких уровнях дерева классов.	Требуется таксономии, но снижает тяжесть ошибок.
Ignore / pseudo-positive	Пропущенные bbox	Высокоуверенные unmatched-регионы не считать обычным фоном.	Простая идея для детекторов; нужен порог уверенности.

Метод	Тип дефекта	Основная идея	Оценка применимости
BBox uncertainty	Неточные bbox	Предсказание координаты и её неопределённости.	Средняя сложность; полезно при noisy boxes и окклюзиях.

Сравнительный анализ методов

Рассмотренные подходы отличаются по уровню вмешательства в обучающий процесс. Bootstrapping и GCE меняют только целевые метки или форму classification loss, поэтому их проще всего использовать в существующих моделях. Иерархическая классификация требует изменения представления классов и, в некоторых вариантах, модификации классификационной головы, но она особенно полезна в задачах с естественными superclass-связями. Методы обработки пропущенных аннотаций и noisy boxes требуют более аккуратной настройки, поскольку затрагивают assignment, negative loss или bbox regression.

С практической точки зрения важно различать коррекцию разметки и робастное обучение. Коррекция пытается восстановить более правильную метку или рамку, но может ошибаться и усиливать шум. Робастное обучение не обязательно исправляет датасет, а снижает влияние сомнительных примеров. Для небольших прикладных исследований предпочтительнее начинать именно с робастных модификаций loss, поскольку они проще воспроизводятся и не требуют сложного teacher-student или multi-stage pipeline.

Наиболее перспективной является комбинация методов. Для классов можно использовать GCE или bootstrapping, для неоднозначных категорий - иерархическую структуру, для пропущенных объектов - ослабление negative loss, а для неточных рамок - uncertainty-weighted regression. Такая схема учитывает, что дефекты разметки имеют разную природу и не должны обрабатываться одним универсальным механизмом.

Вывод

Дефекты обучающей разметки в задачах детекции объектов существенно влияют на качество моделей и могут проявляться на разных уровнях: класс, наличие объекта и координаты bounding box. Обзор показывает, что устойчивость можно повышать без полной ручной очистки датасета. Для шумных классов применимы bootstrapping и generalized cross entropy, для близких и неоднозначных категорий - иерархическая классификация, для пропущенных аннотаций - мягкая обработка потенциальных foreground-регионов, для неточных рамок - регрессия с оценкой неопределённости. Наиболее рациональным является комбинированный подход, при котором тип дефекта определяет выбор метода обучения.

Список литературы

1. Reed S., Lee H., Anguelov D., Szegedy C., Erhan D., Rabinovich A. Training Deep Neural Networks on Noisy Labels with Bootstrapping // arXiv preprint arXiv:1412.6596. 2014.
2. Zhang Z., Sabuncu M.R. Generalized Cross Entropy Loss for Training Deep Neural Networks with Noisy Labels // Advances in Neural Information Processing Systems. 2018.
3. Tsenkova V., Stanchev P., Petrov D., Lazarov D. hYOLO Model: Enhancing Object Classification with Hierarchical Context in YOLOv8 // arXiv preprint arXiv:2510.23278. 2025.
4. Suri S., Rambhatla S., Chellappa R., Shrivastava A. SparseDet: Improving Sparsely Annotated Object Detection with Pseudo-positive Mining // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2023.
5. He Y., Zhu C., Wang J., Savvides M., Zhang X. Bounding Box Regression with Uncertainty for Accurate Object Detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.
6. Pereyra G., Tucker G., Chorowski J., Kaiser L., Hinton G. Regularizing Neural Networks by Penalizing Confident Output Distributions // arXiv preprint arXiv:1701.06548. 2017.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ПРИМЕРЕ ДИФFUЗНОГО ТОКСИЧЕСКОГО ЗОБА

Дарий Е. М.

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

1. Актуальность

Диффузный токсический зоб (болезнь Грейвса) — аутоиммунное заболевание щитовидной железы, проявляющееся гипертиреозом, зобом и экзофтальмом. Несмотря на существующие методы лечения (медикаментозная терапия, радиоiodтерапия, хирургическое вмешательство), у значительной части пациентов не удаётся достичь стойкой ремиссии, а часть прооперированных пациентов сталкивается с послеоперационным рецидивом. В действующих клинических рекомендациях Минздрава РФ отсутствуют формализованные критерии прогнозирования этих исходов, что затрудняет персонализацию лечебной тактики.

Применение методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в клинических данных и формировать предиктивные модели, которые могут служить инструментом поддержки врачебных решений.

2. Цель и задачи работы

Цель: сравнительная оценка моделей машинного обучения для прогнозирования клинического течения ДТЗ — вероятности отсутствия ремиссии при медикаментозном лечении и риска рецидива после хирургического вмешательства.

Задачи:

- анализ и предобработка клинических данных пациентов с ДТЗ;
- сравнение статистических методов и алгоритмов машинного обучения по метрике AUC;
- интерпретация результатов и выявление значимых предикторов отсутствия ремиссии;
- разработка прототипа веб-приложения «ТиреоВектор» для клинического использования.

3. Данные и методология

Исследование выполнено в рамках междисциплинарного взаимодействия с ПСПбГМУ им. И. П. Павлова. Набор данных включает информацию о 185 пациентах с установленным диагнозом ДТЗ (86 клинико-анамнестических параметров). Для первой задачи в качестве целевой переменной выступало отсутствие ремиссии при медикаментозной терапии; для второй — наличие рецидива после тиреоидэктомии.

На этапе предобработки были исключены признаки с долей пропусков более 30%, сформирован финальный набор из 26 информативных параметров, выполнена нормализация данных и заполнение пропусков (среднее/медиана/мода в зависимости от распределения признака).

Для оценки качества моделей применялась повторная стратифицированная 4-блочная кросс-валидация (30 повторений, итого 120 оценок на модель, разбивка 75/25%). Основная метрика — AUC (площадь под ROC-кривой).

Протестированы 10 алгоритмов: логистическая регрессия, линейный и квадратичный дискриминантный анализ, наивный байесовский классификатор, KNN, SVM, дерево решений, случайный лес, XGBoost, многослойный перцептрон.

4. Результаты сравнения моделей

Ансамблевые методы существенно превосходили традиционные статистические подходы ($p < 0,001$ по t-критерию Стьюдента):

- XGBoost: $AUC = 0,830 \pm 0,035$ — наилучший результат;
- Случайный лес: $AUC = 0,821 \pm 0,046$;
- Средний AUC методов МО: 0,741 против среднего AUC статистических методов: 0,673.

Преимущество ансамблевых алгоритмов обусловлено их способностью автоматически моделировать нелинейные зависимости и взаимодействия между клиническими признаками.

5. Ключевые предикторы отсутствия ремиссии

Анализ значимости признаков (усреднение по 120 экспериментам) выявил устойчивые предикторы отсутствия ремиссии, согласованно выделенные обеими моделями:

- уровень ТТГ через 1,5 года после начала лечения / перед отменой терапии;
- начальный объем щитовидной железы по УЗИ и через 1,5 года лечения / перед отменой;
- возраст начала заболевания
- начальный уровень свободного Т₄, Т₃ и их соотношение;

Выявленные ассоциации отражают статистические закономерности и открывают направления для дальнейших клинических исследований.

6. Веб-приложение «ТиреоВектор»

На основе результатов исследования разработан прототип веб-приложения «ТиреоВектор» (Python + JavaScript). Функциональные возможности:

- ввод клинико-лабораторных показателей пациента до и после тиреоидэктомии;
- прогноз вероятности отсутствия ремиссии (модели: Случайный лес + XGBoost);
- прогноз риска послеоперационного рецидива (модели: KNN + ExtraTrees);
- таблица важности признаков для интерпретируемости каждого конкретного прогноза;
- функция дообучения моделей при вводе верифицированных исходов заболевания.

7. Заключение

Работа демонстрирует практическую применимость методов машинного обучения для прогнозирования клинического течения ДТЗ. Решены две задачи бинарной классификации: прогноз вероятности отсутствия ремиссии при медикаментозной терапии и прогноз риска рецидива после хирургического вмешательства. Ансамблевые алгоритмы обеспечивают высокую предсказательную способность (AUC до 0,83) и превосходят традиционные статистические модели. Разработанное приложение «ТиреоВектор» готово к апробации в клинической практике в качестве системы поддержки врачебных решений.

Перспективы: валидация на расширенных наборах клинических данных, изучение причинно-следственного влияния выявленных предикторов, разработка персонализированных алгоритмов терапии.

ПОДХОД К СТРУКТУРОВАНИЮ И СТАНДАРТИЗАЦИИ ПАЦИЕНТСКОГО АРХИВА ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OCR, LOINC И UCUM

ИСАЕВА Е. А.,

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

Аннотация. Рассматривается подход к преобразованию лабораторных данных, находящихся на стороне пациента, из неструктурированных документов в стандартизированное представление. Пациент часто хранит результаты исследований из разных лабораторий в виде бумажных бланков, фотографий, сканов и PDF-файлов. Эти данные содержат медицински значимую информацию, но без дополнительной обработки остаются личным архивом, плохо пригодным для анализа динамики состояния. Предлагаемый подход включает OCR-распознавание, восстановление табличной структуры, сохранение результатов в локальной базе данных, пользовательскую проверку, сопоставление показателей с LOINC и нормализацию единиц с UCUM. Этот подход позволяет рассматривать пациентский архив как источник медицинских данных, пригодных для мониторинга состояния, подготовки информации для врача и дальнейшей интеграции с медицинскими информационными системами [1], [2].

Ключевые слова: *пациентские данные, лабораторные исследования, OCR, медицинские документы, локальная база данных, LOINC, UCUM, интероперабельность, мобильное приложение.*

Введение

Пациент получает результаты лабораторных исследований из различных источников: государственных и частных клиник, диагностических центров, лабораторий и мобильных сервисов. Эти данные могут храниться в различных форматах — бумажных бланках, фотографиях, сканах или PDF-файлах. Несмотря на то, что эти документы содержат важную медицинскую информацию, они не пригодны для автоматической обработки и анализа без предварительной стандартизации.

Пациентские данные могут быть более полными, чем те, что хранятся в одном медицинском учреждении, поскольку человек может сдавать анализы в разных лабораториях, получать результаты в разных странах и хранить их на протяжении длительного времени. Однако эти данные часто остаются вне единой медицинской базы данных, что затрудняет их использование для дальнейшего анализа. В настоящее время различные лаборатории используют стандарты LOINC и UCUM, а также общие международные классификации, такие как ICD. Однако проблемы возникают не из-за несовместимости стандартов, а из-за отсутствия единой централизованной базы данных, куда поступают все результаты. Лаборатории, несмотря на использование стандартов, часто сохраняют данные в своих локальных системах, что делает их труднодоступными для интеграции и анализа в едином контексте.

Задача заключается в стандартизации разрозненных данных с целью их использования в медицинских системах и повышения их совместимости. Применяя стандарты LOINC и UCUM, мы можем привести данные к единому формату, что делает их пригодными для анализа, мониторинга состояния пациента, а также для сравнения показателей в разных временных промежутках и разных медицинских учреждениях [1], [2].

Постановка задачи

Оптическое распознавание текста (OCR) позволяет извлечь данные из изображений и PDF-документов, но само распознавание не решает проблемы совместимости.

Лабораторные данные должны быть структурированы и приведены к общим стандартам для использования в медицинских системах. Задачи включают:

- извлечение показателей из медицинских документов;
- нормализацию единиц измерения с помощью UCUM;
- стандартизацию показателей с использованием LOINC;
- создание локальной базы данных для хранения данных пациента и их проверки.

Целью работы является разработка подхода к структурированию и стандартизации данных лабораторных исследований, находящихся у пациента, с использованием LOINC и UCUM, а также создание локальной базы данных для хранения и анализа этих данных.

Предлагаемый подход

1. Загрузка документа — пациент загружает изображение или PDF с результатами анализов.
2. Предобработка изображения — коррекция контраста и удаление шума для улучшения качества распознавания.
3. OCR-распознавание — изображение преобразуется в текст, но результат может содержать ошибки.
4. Восстановление структуры документа — выделение строк анализа и преобразование их в отдельные записи.
5. Преобразование данных в записи базы данных — каждая строка сохраняется как запись в базе данных.
6. Пользовательская проверка — пациент проверяет и исправляет данные, улучшая их точность и устраняя возможные ошибки.
7. Нормализация единиц с использованием UCUM — приведение единиц измерения к стандарту.
8. Сопоставление с LOINC — связывание показателей с кодами LOINC.
9. Валидация данных — проверка на корректность и консистентность данных.
10. Использование данных — стандартизированные данные используются для построения графиков и анализа динамики.

Значение пациентских данных

Пациентские лабораторные данные часто оказываются более полными, чем те, которые хранятся в одном медицинском учреждении. Пациент может сдавать анализы в разных лабораториях, обращаться к разным специалистам, проходить обследования в разных регионах или странах. Такие данные могут содержать важную информацию, но часто остаются разрозненными и хранятся в разных форматах — бумажных бланках, сканах, фотографиях или PDF-файлах, что затрудняет их использование в медицинских информационных системах.

Стандартизация данных позволяет объединить их и сделать пригодными для анализа и дальнейшей работы. Используя LOINC для идентификации лабораторных показателей и UCUM для нормализации единиц измерения, мы можем привести эти данные к единому формату, что делает их совместимыми с медицинскими информационными системами и позволяет врачу более точно отслеживать динамику состояния пациента, выявлять отклонения и принимать обоснованные решения.

Даже если данные остаются на устройстве пациента, они могут быть переданы лечащему врачу в стандартизированном виде, обеспечивая целостную картину состояния пациента. Это позволяет врачу не только просматривать отдельные результаты анализов,

но и использовать эти данные для долгосрочного наблюдения, оценки изменений в состоянии пациента и корректировки лечения. Стандартизированные данные, представленные в едином формате, могут быть использованы для интеграции с другими медицинскими системами, что повышает эффективность и согласованность процессов диагностики и лечения [3].

Особенности хранения и редактирования данных

Локальная база данных играет ключевую роль в разделении исходного документа и структурированных данных. Исходный файл сохраняется как источник, в то время как структурированные данные представляют собой отдельные записи, которые могут быть удобно обработаны. Это позволяет пациенту работать с данными, которые уже приведены в удобный для анализа формат, вместо того, чтобы вручную извлекать информацию из сырых данных OCR.

Нормализация единиц измерения с использованием UCUM и идентификация показателей через LOINC позволяют привести данные к единому стандарту, обеспечивая совместимость и пригодность для дальнейшего анализа. Это не только помогает систематизировать данные, но и гарантирует, что результаты из разных лабораторий можно будет корректно сравнивать и использовать для построения динамики состояния пациента.

При этом важным моментом является то, что пользователь может редактировать только структурированные данные. Это позволяет избежать ошибок, которые могли бы возникнуть при ручном редактировании всего текста или таблицы. Таким образом, пациент работает только с теми данными, которые были выделены системой, что упрощает процесс редактирования и снижает вероятность ошибки.

В дальнейшем такая система помогает не только улучшить качество данных, но и обеспечить прозрачность всех изменений, сделанных пользователем. Эти данные сохраняются в локальной базе и могут быть использованы для построения графиков, мониторинга динамики и подготовки данных для дальнейшего анализа или передачи врачу [4].

Заключение

Лабораторные данные пациента могут стать важным источником информации для мониторинга состояния организма, если их правильно структурировать и стандартизировать. OCR-распознавание — это только первый этап, после которого данные необходимо привести к стандартам LOINC и UCUM для обеспечения их совместимости с медицинскими системами.

Предложенный подход позволяет пациенту хранить и обрабатывать свои медицинские данные локально, предоставляя возможность быстрого доступа к ним, а также улучшая мониторинг состояния здоровья. Это особенно важно для пациентов, которые сталкиваются с различными клиниками и лабораториями, что делает хранение данных в одном месте удобным и эффективным.

Дальнейшее развитие работы будет направлено на уточнение правил сопоставления лабораторных показателей, расширение словаря синонимов и улучшение интерфейса для работы с данными. Эти шаги сделают систему более гибкой и точной при обработке разных типов данных.

В дальнейшем эти стандартизированные данные могут быть экспортированы в формат FHIR, что позволит интегрировать их с медицинскими информационными системами,

обеспечивая плавный и беспрепятственный обмен данными между различными учреждениями и специалистами [5].

Список литературы

1. LOINC Committee. LOINC Users' Guide [Электронный ресурс]. Regenstrief Institute. URL: <https://loinc.org/kb/users-guide/> (дата обращения: 02.05.2026).
2. Regenstrief Institute. The Unified Code for Units of Measure [Электронный ресурс]. URL: <https://ucum.org/ucum> (дата обращения: 02.05.2026).
3. HL7 International. FHIR R4 Observation Resource [Электронный ресурс]. URL: <https://hl7.org/fhir/R4/observation.html> (дата обращения: 02.05.2026).
4. Smith R. An Overview of the Tesseract OCR Engine // Proceedings of the Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition. 2007. Т. 2. С. 629–633.
5. World Health Organization. Global strategy on digital health 2020–2025 [Электронный ресурс]. Geneva: World Health Organization, 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240020924> (дата обращения: 02.05.2026).

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОКУМЕНТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ БАЗЕ ЗНАНИЙ

МИХАЙЛОВА М. А.

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

Аннотация. В работе предложена иерархическая модель организации базы знаний, включающая четыре уровня. Описан алгоритм автоматического распределения документов, основанный на двухуровневой кластеризации с применением методов UMAP и HDBSCAN с адаптивными параметрами. Предложен механизм обогащения векторных представлений редкими TF-IDF-признаками для повышения разделимости близких по тематике документов. Приведён комплекс метрик для оценки качества построенной иерархии.

Ключевые слова: база знаний, иерархическая кластеризация, UMAP, HDBSCAN

Введение

Рост объемов корпоративной документации в государственных и коммерческих структурах приводит к тому, что традиционные методы организации информации перестают справляться с задачей навигации по большим коллекциям.

Гипотеза: двухуровневая иерархическая кластеризация документных эмбедингов с адаптивными параметрами и нечетким назначением документов позволяет автоматически построить наведируемую многоуровневую структуру базы знаний, обеспечивающую семантически связанные группировки на каждом уровне иерархии.

Современные подходы к организации баз знаний можно разделить на плоские векторные хранилища[2][3], обеспечивающие эффективный семантический поиск, но не предоставляющие иерархической навигации, ручные таксономии и онтологии, точные, однако требующие значительных экспертных трудозатрат при создании и сложные в поддержке при изменении корпуса[3], и методы тематического моделирования (LDA, BERTopic)[1], автоматически выявляющие темы, но, как правило, работающие на одном уровне абстракции без явного соответствия между глобальными категориями и более специализированными подгруппами.

В рамках настоящей работы предложена иерархическая модель базы знаний, которая объединяет преимущества автоматической кластеризации и структурированной навигации.

Модель реализована в виде пайплайна автоматической обработки документов без необходимости ручной разметки.

Иерархическая модель базы знаний

Предлагаемая модель основана на четырех уровнях организации информации. Верхний уровень — юнит (L1) — представляет собой семантически связную тематическую группу документов. Каждый юнит получает человекочитаемое название и описание, генерируемые языковой моделью на основе ключевых документов группы. Второй уровень — подтема (L2) — детализирует содержание юнита: это кластер документов внутри юнита, объединенных более специфической темой. Третий уровень — документ — хранит метаданные, суммаризацию и ключевые слова исходного файла. Четвертый уровень — фрагмент — это текстовый чанк документа, непосредственно используемый при семантическом поиске

Пусть $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ — коллекция из n документов. Каждый документ d_i представлен в $e_i \in \mathbb{R}^m$ и $e_i \in \mathbb{R}^m$, полученным из языковой модели-энкодера. Множество юнитов

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ формирует первый уровень иерархии.

Также реализовано нечеткое назначение: документ d_i может одновременно принадлежать нескольким юнитам. Для каждого документа HDBSCAN возвращает распределение вероятностей $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}) = (p_{i1} p_{ij1}, \dots, p_{ik})$, где p_{ij} — вероятность принадлежности документа d_i юниту u_j [4][6]. Документ включается в u_j , если $p_{ij} \geq \tau_1$ и $p_{ij} \geq \tau_1$, где τ_1 — порог первого уровня [6].

Аналогично строится второй уровень: для каждого юнита u_j , содержащего не менее $N_{\min}$ документов, выполняется повторная кластеризация документов из u_j . Таким образом образуется множество подтем $S_j = \{s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jk}\}$ внутри юнита. Назначение на подтему также нечеткое с порогом $\tau_2 < \tau_1$.

Документ в данной модели является объектом одновременно нескольких уровней. Каждый документ характеризуется: заголовком и суммаризацией, извлеченными языковой моделью; списком ключевых тем; вектором, формируемым конкатенацией заголовка, суммаризации и тем; набором фрагментов — текстовых чанков, на которые разбивается оригинальное содержание документа для последующего поиска.

Разбиение на фрагменты осуществляется с учетом иерархии структурных элементов текста: сначала по заголовкам markdown-разметки, затем по предложениям с соблюдением минимального коэффициента заполнения чанка (0.75) и максимального размера в символах.

Алгоритм автоматического распределения документов

Алгоритм построения иерархии реализован в виде последовательного пайплайна, включающего пять этапов.

На первом этапе каждый документ обрабатывается языковой моделью: из текста извлекаются краткое название (до 12 слов), суммаризация в 2–3 предложениях на русском языке и список из 3–5 ключевых тем. Данный подход позволяет привести разнородные по форме документы к унифицированному семантическому представлению, не зависящему от исходного формата.

Среднее попарное косинусное сходство между документами вычисляется как

$$\text{sim_avg} = \left(\frac{2}{n(n-1)} \right) \cdot \sum_{i,j} \cos(e_i, e_j)$$

и служит индикатором семантической связности [2]. Высокое среднее сходство (> 0.70) сигнализирует о слабой разделимости и требует дополнительного обогащения. Вначале удаляются наиболее распространенные слова, после чего повторно вычисляются эмбединги. Затем к нормализованным эмбедингам конкатенируются нормализованные TF-IDF-векторы по словарю редких слов (тех, что входят в наименьшее число документов), умноженные на коэффициент `rare_weight`. Итоговая матрица передается на кластеризацию.

Первый уровень кластеризации выполняется в два шага. Сначала UMAP снижает размерность матрицы с нескольких сотен до 15 измерений (при корпусе > 200 документов)[5]. Метрика пространства — косинусная. Затем HDBSCAN выполняет кластеризацию в сниженном пространстве.

Параметры UMAP и HDBSCAN адаптируются под размер корпуса. При числе документов менее 50 используются малые значения `n_neighbors` (до 10) и `n_components` (до 3), поскольку в маленьких корпусах крупные значения этих параметров приводят к слипанию всех точек в один кластер. При корпусах от 2000 документов `n_neighbors` уменьшается до 10, а `min_cluster_size` возрастает до 15, обеспечивая более детальное разбиение. Таблица 2 приводит конфигурацию параметров по умолчанию для двух уровней кластеризации.

Для каждого юнита выполняется независимая кластеризация документов этого юнита. Параметры L2 существенно мягче параметров L1, что позволяет выявлять мелкие, семантически однородные группы внутри широких тематических юнитов.

После завершения кластеризации каждый юнит и каждая подтема получают человекочитаемые название и описание. Для этого отбираются `n` документов, наиболее близких к центроиду кластера (евклидово расстояние в пространстве UMAP), и передаются в языковую модель вместе со списком характерных тем кластера.

Метрики оценки качества иерархии

Для оценки качества построенной иерархии используется комплекс метрик, охватывающих как традиционные критерии кластеризации, так и специфические характеристики нечеткого многоуровневого разбиения. В таблице 1 приведены все метрики с диапазонами значений и целевыми ориентирами.

Таблица 1

Метрики качества иерархической кластеризации

Метрика	Диапазон	Что измеряет	Целевое значение
Silhouette Score (L1)	$[-1; 1]$	Разделимость юнитов	$> 0.08-0.15$
Davies-Bouldin Index (L1)	$[0; +\infty)$	Компактность и разделимость (меньше — лучше)	$< 2.0-3.5$
Intra similarity (L1)	$[0; 1]$	Среднее косинусное сходство внутри юнита	$0.50-0.80$
Inter similarity (L1)	$[0; 1]$	Среднее косинусное сходство между юнитами	$< 0.30-0.45$
Partition Coefficient (L1)	$[0; 1]$	Качество нечеткого разбиения (выше — лучше)	$> 0.5-0.7$
Avg entropy (L1)	$[0; +\infty)$	Размытость вероятностного распределения	$0.8-1.5$
Cophenetic Correlation	$[0; 1]$	Сохранение иерархии расстояний (выше — лучше)	$> 0.7-0.9$

Noise fraction	[0; 1]	Доля документов, не попавших ни в один юнит	< 0.20
Avg units per document	[0; +∞)	Среднее число юнитов, в которые входит документ	0.6–1.2
Subtopic coverage	[0; 1]	Доля документов, получивших подтему (L2)	0.6–0.9
Parent-child similarity	[0; 1]	Близость центроида подтемы к центроиду юнита	0.7–0.95
Avg cosine sim (original)	[0; 1]	Среднее сходство исходных эмбедингов	0.40–0.70
Avg cosine sim (after rare boost)	[0; 1]	Среднее сходство после обогащения TF-IDF	< исходного

В рамках работы разработана и реализована иерархическая модель базы знаний, включающая четыре уровня: юнит, подтема, документ и текстовый фрагмент.

Предложенный подход имеет ряд принципиальных отличий от существующих методов тематического моделирования. BERTopic также использует UMAP и HDBSCAN, однако строит одноуровневые темы, представленные словами, а не человекочитаемыми описаниями. В предложенной модели каждый уровень описывается сгенерированным языковой моделью текстом, документ представляет собой полноценный объект со своими атрибутами, а не просто точка в пространстве. Механизм нечеткого назначения документов позволяет работать с тематически неоднозначными документами без принудительного выбора единственной группы. Адаптивная настройка параметров UMAP и HDBSCAN под размер корпуса решает практическую проблему применимости метода к коллекциям разного масштаба.

Ограничением предложенного подхода является зависимость качества иерархии от качества эмбедингов и суммаризаций, формируемых языковой моделью на этапе подготовки. Ошибочная суммаризация или неверный набор ключевых тем может привести к некорректному позиционированию документа.

Практическая применимость предложенной технологии обусловлена ее независимостью от конкретной предметной области и форматов входных документов: система поддерживает PDF, DOCX, HTML, Markdown и другие форматы. Адаптивные параметры кластеризации обеспечивают корректную работу на корпусах от 30 до нескольких тысяч документов.

Таблица 2

Параметры кластеризации по умолчанию

Параметр	L1 (по умолчанию)	L2 (по умолчанию)	Роль
umap_n_neighbors	30	7	Ширина локального контекста
umap_n_components	15	3	Целевая размерность пространства
umap_min_dist	0.05	0.05	Минимальное расстояние в проекции
hdbscan_min_cluster_size	15 (адапт.)	4	Минимальный размер кластера
hdbscan_min_samples	5 (адапт.)	2	Устойчивость к шуму

Список литературы

1. Grootendorst M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure // arXiv:2203.05794. — 2022.

2. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks // Proceedings of EMNLP 2019. — Association for Computational Linguistics, 2019. — P. 3982–3992.
3. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 544 p.
4. Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. — Berlin: Springer, 2013. — P. 160–172.
5. McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction // arXiv:1802.03426. — 2018.
6. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. — New York: Plenum Press, 1981. — 256 p.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ WHISPER AI ДЛЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

НОСУЛЕНКО П.А., КАРПАЧЁВ А.

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного тестирования трех моделей семейства Whisper AI – tiny, base и small – для задач автоматического распознавания русской разговорной речи. Целью работы является оценка точности, производительности и робастности моделей, а также выявление оптимального баланса между качеством распознавания и скоростью обработки. На основе полученных результатов сформулированы практические рекомендации по выбору модели в зависимости от приоритетов качества и производительности.

Ключевые слова: автоматическое распознавание речи, ASR, Whisper AI, нейронные сети, транскрибация, Word Error Rate, Real-Time Factor

Технологии автоматического распознавания речи (Automatic Speech Recognition, ASR) [1] занимают ключевое место в современной цифровой трансформации. В условиях стремительного роста объемов аудиоданных — от записей деловых встреч и телефонных переговоров до видеоконференций и пользовательского контента — потребность в эффективных инструментах автоматической транскрибации становится критически важной, так как ручная обработка аудиоматериалов требует значительных временных и трудовых затрат, что создает объективную потребность во внедрении автоматизированных решений.

Среди существующих ASR-систем особое место занимает Whisper — открытая нейросетевая модель, разработанная компанией OpenAI [2]. Ее ключевыми преимуществами являются бесплатное использование, открытый исходный код, поддержка множества языков, включая русский, а также возможность локального развертывания на собственном оборудовании без зависимости от внешних API-сервисов. Модель обучена на массиве из более чем 680 тысяч часов размеченной речи, что обеспечивает высокую устойчивость к различным акустическим условиям, акцентам и фоновым шумам.

Целью настоящей работы является проведение комплексного сравнительного тестирования моделей Whisper AI (tiny, base, small) для оценки их точности распознавания русскоязычной речи, производительности на доступном оборудовании, а также выявление оптимального баланса между качеством и скоростью работы.

Для проведения тестирования был использован датасет SOVA RuDevices [3], представляющий собой коллекцию русскоязычных аудиозаписей разговорной речи. Датасет содержит 358 пар файлов, где каждый аудиофайл в формате WAV сопровождается текстовой транскрипцией в формате TXT с тем же именем. Общая длительность аудиоматериала составляет 20 минут 53 секунды.

Анализ длительности аудиофайлов показал, что записи варьируются от 1,02 до 9,99 секунд, при этом средняя длительность составляет 3,5 секунды. Важной характеристикой датасета является наличие разговорной речи с элементами неформальной лексики, что соответствует реальным сценариям использования и позволяет объективно оценить робастность моделей.

В рамках исследования проверялся ряд требований к моделям Whisper AI, критически важных для практического внедрения [2]. Точность распознавания оценивалась с использованием метрик Word Error Rate (WER) — доля ошибок на уровне слов (замены, вставки, удаления), и Character Error Rate (CER) — доля ошибок на уровне отдельных символов. Производительность оценивалась с помощью показателя Real-Time Factor (RTF), определяемого как отношение времени обработки аудио к его фактической длительности. Робастность проверялась через способность моделей сохранять качество работы при различной длительности фраз, при наличии нестандартной лексики и в сложных акустических условиях. Анализировалось распределение файлов по категориям качества, а также выявлялись наиболее проблемные сценарии для каждой модели.

Для каждой из трех моделей был выполнен последовательный прогон по всем 358 парам аудио-текст. Параметры транскрибации были едиными для всех моделей: язык указан явно как русский, размер луча установлен в 5, активирован фильтр определения голосовой активности для подавления шумовых участков. После обработки всех файлов для каждой модели вычислялись: взвешенный WER, медианный WER, средний CER, RTF, среднее время обработки одного файла. Результаты тестирования трех моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные результаты тестирования моделей Whisper AI

Название	WER, %	CER, %	RTF	Время на один файл, с	Общее время, с
tiny	29.35	32.81	0.183	0,64	230.07
base	23.73	37.9	0.257	0,90	322.23
small	17.97	29.82	0.575	2,01	721.2

Анализ полученных данных показывает, что модель small демонстрирует наилучшую точность распознавания: взвешенный WER составляет 17,97%, что на 5,76 процентных пункта лучше показателя модели base (23,73%) и на 11,38 процентных пункта лучше модели tiny (29,35%). По побуквенной точности (CER) модель small также показывает лучший результат — 29,82%, незначительно опережая модель tiny (32,81%) и существенно превосходя модель base (37,90%).

В отношении производительности наблюдается обратная зависимость: модель tiny работает наиболее быстро, обеспечивая $RTF = 0,183$, что означает обработку аудио в 5,5 раз быстрее реального времени. Модель base демонстрирует $RTF = 0,257$ (обработка в 3,9 раза быстрее реального времени), а модель small — $RTF = 0,575$ (обработка в 1,74 раза быстрее реального времени). Соответственно, общее время тестирования для модели small составило 11,87 минут, для base — 5,42 минут, для tiny — 3,85 минут.

Анализ проблемных файлов показал, что наибольшие трудности для всех моделей представляют имена собственные, редкие слова и звукоподражания. При этом модель small демонстрирует лучшую способность к распознаванию таких единиц. Кроме того, были выявлены случаи «зацикливания» (многократного повторения одного слова) у модели base

на коротких аудио, в то время как модель small справлялась с такими фрагментами значительно лучше.

В ходе проведенного исследования было выполнено комплексное сравнительное тестирование трех моделей семейства Whisper AI — tiny, base и small. Основные результаты работы позволяют сформулировать следующие выводы.

По точности распознавания модель small является безусловным лидером: взвешенный WER составляет 17,97%, что является отличным показателем для открытой ASR-системы. Модель base демонстрирует хорошее качество (WER 23,73%), а модель tiny — приемлемое для не критичных сценариев (WER 29,35%).

По производительности модель tiny обеспечивает максимальную скорость (RTF 0,183, обработка 7800 часов аудио в месяц). Модель base (RTF 0,257, 5500 часов в месяц) и модель small (RTF 0,575, 2500 часов в месяц) также работают быстрее реального времени, что подтверждает их пригодность для промышленной эксплуатации.

По робастности модель small демонстрирует наилучшую устойчивость к коротким фразам, нестандартной лексике и сложным акустическим условиям, обеспечивая отличное качество для 74% файлов. Модели base и tiny уступают ей в этом аспекте, но сохраняют приемлемую робастность при достаточной длительности аудио (более 6 секунд).

Таким образом, Whisper AI представляет собой эффективное, бесплатное и масштабируемое решение для задач распознавания русской речи. Разнообразие доступных моделей позволяет гибко выбирать конфигурацию в зависимости от конкретных бизнес-требований к качеству и производительности, что подтверждает целесообразность его внедрения в современные продукты и сервисы, работающие с аудиоданными.

Список литературы

1. Dong Yu, Li Deng. Automatic Speech Recognition. A Deep Learning Approach. — Springer-Verlag London, 2015. — 321 p.
2. Система автоматического распознавания речи Whisper OpenAI, URL: <https://openai.com/ruru/index/whisper/>
3. Open Source датасет SOVA: аудио для распознавания и синтеза речи / OpenAI, URL: https://habr.com/ru/companies/ashmanov_net/articles/554842/

МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗА ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ БОЛЕЗНЯМИ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ

Скринников Д. А.¹, Макурин А. Е.¹, Кадуцкая Д. Д.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет

Аннотация. В работе рассматривается задача прогнозирования временных рядов в области медицины. Актуальность исследования связана с необходимостью заранее оценивать будущую заболеваемость для планирования ресурсов фармацевтического рынка. Анализ стандартных моделей показал, что отдельные модели не обеспечивают устойчиво корректный прогноз для всех рядов. Поэтому был применён ансамблевый подход, объединяющий несколько моделей прогнозирования. Разработанная модель учитывает аномальные периоды, подбирает веса моделей и формирует прогноз с доверительными интервалами. Практическая значимость работы заключается в возможности использования прогноза для планирования ресурсов здравоохранения и фармацевтики.

Ключевые слова: данные в области медицины, прогнозирование, ансамблевая модель, выбросы, MAPE

Введение

Прогнозирование временных рядов в области медицины является важной задачей, поскольку позволяет заранее оценивать возможную динамику заболеваемости и принимать более обоснованные управленческие решения. В здравоохранении такие прогнозы могут использоваться для планирования нагрузки на медицинские учреждения, оценки потребности в лекарственных препаратах и распределения ресурсов. Особенно актуальным это становится для заболеваний, распространённость которых имеет устойчивую тенденцию к росту.

В данной работе рассматриваются заболевания печени и ожирение. Для анализа используются четыре показателя: общие случаи заболеваний печени, новые случаи заболеваний печени, общие случаи ожирения и новые случаи ожирения. Такое разделение важно, поскольку общие случаи отражают накопленную распространённость заболевания, а новые случаи позволяют оценить текущую интенсивность его появления.

Практическая значимость задачи подтверждается связью между динамикой заболеваемости и потреблением лекарственных препаратов. Продажи ряда препаратов имеют среднюю и сильную корреляцию с динамикой заболеваний. Например, у некоторых препаратов-лидеров рынка корреляция превышает 70–80 %, что указывает на возможность использования прогноза заболеваемости для более точного планирования фармацевтического рынка.

Однако прогнозирование данных в области медицины осложняется несколькими факторами. Во-первых, временные ряды имеют ограниченную длину, примерно 15–25 лет наблюдений. Во-вторых, данные могут содержать шумы (случайные колебания), выбросы (отдельное аномальное значение временного ряда, которое резко отличается от соседних наблюдений) и структурные сдвиги (изменение поведения временного ряда относительно остальной динамики ряда, которое затрагивает не одну точку, а целый период). В-третьих, период 2020–2023 годов, связанный с пандемией COVID-19, мог вызвать структурные сдвиги и временные просадки в статистике. Поэтому стандартные модели не всегда способны корректно отличить временную аномалию от долгосрочной тенденции.

Цель работы — построить модель прогнозирования, способную учитывать особенности временных рядов в области медицины и давать устойчивые результаты на коротких и зашумлённых данных.

Методология

На первом этапе были рассмотрены стандартные классы моделей прогнозирования: регрессионные модели, авторегрессионные модели, модели экспоненциального сглаживания и методы машинного обучения. Их сравнение показало, что каждый подход имеет ограничения. Регрессионные модели недостаточно хорошо учитывают временную структуру ряда. Авторегрессионные модели не всегда корректно отражают ускорение или замедление роста. Модели экспоненциального сглаживания могут завышать будущую динамику. Методы машинного обучения при малом количестве наблюдений часто дают нестабильные или почти горизонтальные прогнозы.

В связи с этим в работе был выбран ансамблевый подход. Его суть заключается в том, что итоговый прогноз строится не одной моделью, а комбинацией нескольких моделей. Это позволяет снизить влияние ошибок отдельного метода и получить более устойчивый результат. В ансамбль вошли модели, отвечающие за разные типы динамики: экспоненциальная регрессия — за устойчивый процентный рост, взвешенный полином — за изменение темпа роста или замедления, метод Хольта с затуханием — за сглаженный тренд без чрезмерного продолжения роста, drift — за краткосрочный импульс и влияние

последних изменений ряда, гармоническая модель Фурье — за возможные циклические компоненты, а ARIMA — за автокорреляцию и внутреннюю временную структуру ряда.

Важной частью модели стала обработка выбросов и структурных сдвигов. Для рядов в области медицины это особенно важно, поскольку резкие изменения могут быть связаны не только с реальным изменением заболеваемости, но и с особенностями регистрации данных. Например, COVID-период мог привести к временной просадке показателей, которая не должна автоматически переноситься в будущий прогноз. Поэтому в модели применяется коррекция аномальных точек: грубые выбросы корректируются сильнее, а умеренные отклонения учитываются частично.

После обработки данных каждая модель строит собственный прогноз. Затем с помощью walk-forward валидации оценивается качество каждой модели, и на основе ошибки MAPE подбираются веса. Чем точнее модель показывает себя на проверочных шагах, тем больший вклад она получает в итоговый ансамбль. Кроме точечного прогноза, модель строит доверительные интервалы, которые показывают возможный диапазон будущих значений.

Результаты

Прогноз строился на 2025–2029 годы. Все четыре ряда показали продолжение долгосрочного восходящего тренда. При этом модель не восприняла COVID-период как начало устойчивого снижения, а учла его как временный структурный сдвиг. Результаты работы модели можно увидеть на в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Прогноз модели

Год	Больные (общ.)	Больные (нов.)	Ожирение (общ.)	Ожирение (нов.)
2025	605 621	92 867	3 172 171	555 762
2026	615 424	93 713	3 358 856	558 975
2027	625 236	94 445	3 553 483	560 985
2028	635 062	95 239	3 756 764	561 803
2029	644 911	95 955	3 969 053	562 365

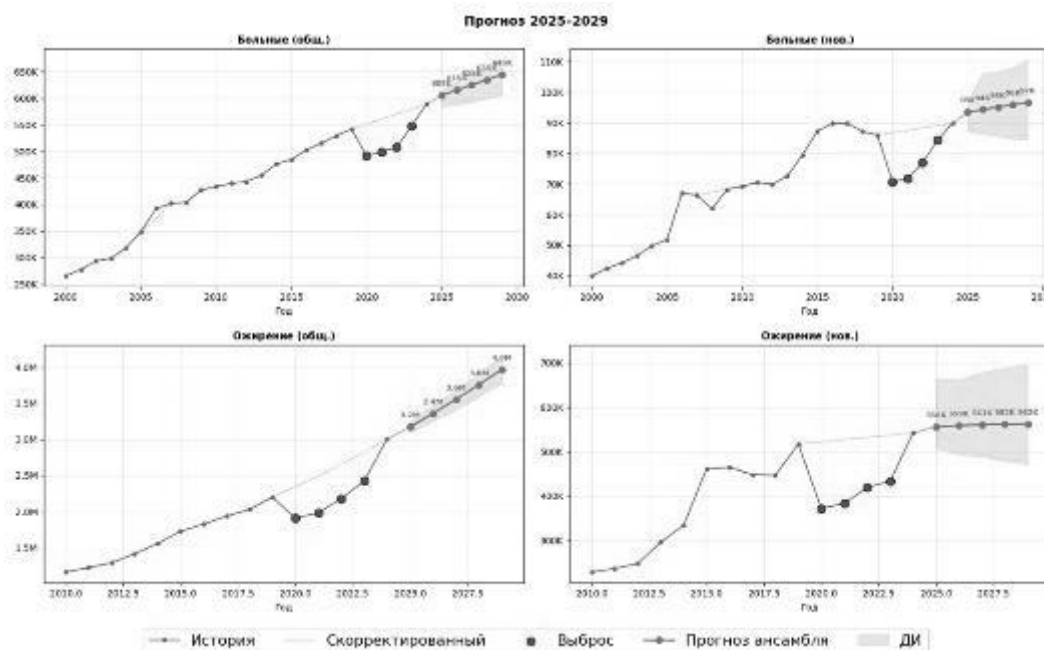


Рис. 1. Прогнозы моделей на заданных временных рядах

Отдельное значение имеют доверительные интервалы. Они показывают, насколько надёжным является прогноз. Более устойчивыми оказались прогнозы по общим случаям заболеваний. Для общих случаев ожирения ширина доверительного интервала на 2029 год составила 9,4 %, а для общих случаев заболеваний печени — 10,5 %. Это говорит о достаточно высокой устойчивости прогноза по этим показателям.

Для новых случаев интервалы шире: 26,7 % для заболеваний печени и 40,2 % для ожирения. Это объясняется большей изменчивостью (большая степень колебания значений временного ряда от одного периода к другому) новых случаев. Такие ряды сильнее зависят от краткосрочных факторов, особенностей диагностики и регистрации. Поэтому прогноз по ним следует интерпретировать осторожнее.

Дополнительно была проведена оценка качества прогноза с использованием метрики MAPE на горизонтах от одного до пяти лет (см. таблицу 2).

Таблица 2

Значение метрики MAPE на горизонте

Ряд	h = 1	h = 2	h = 3	h = 4	h = 5
Больные (общ.)	1.57	2.13	3.06	4.18	5.14
Больные (нов.)	4.07	6.37	9.21	10.66	13.21
Ожирение (общ.)	1.11	1.24	1.52	2.33	3.34
Ожирение (нов.)	4.43	5.31	7.11	10.84	10.91

В целом результаты MAPE подтверждают устойчивость предложенной модели. На всех рядах ошибка возрастает по мере увеличения горизонта прогнозирования, что является ожидаемым результатом. При этом для общих случаев заболеваний ошибка остаётся низкой даже на пятилетнем горизонте, а для новых случаев сохраняется в допустимых пределах. Следовательно, модель может быть использована как для краткосрочного, так и для среднесрочного прогнозирования показателей в области медицины.

Заключение

В ходе работы была рассмотрена задача прогнозирования временных рядов в области медицины на примере заболеваний печени и ожирения. Для решения проблемы коротких и зашумлённых данных был применён ансамблевый подход, объединяющий несколько моделей прогнозирования и учитывающий возможные выбросы и структурные сдвиги. Полученные результаты показали, что в период 2025–2029 годов по всем рассматриваемым показателям сохраняется восходящий тренд. Наиболее выраженный рост прогнозируется по общим случаям ожирения, что подчёркивает актуальность дальнейшего мониторинга данного заболевания. Оценка качества прогноза с помощью MAPE показала низкую ошибку для общих случаев заболеваний даже на пятилетнем горизонте, а более высокая ошибка по новым случаям объясняется их большей изменчивостью. Таким образом, предложенная модель может быть использована для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования показателей в области медицины, а также для планирования ресурсов здравоохранения и фармацевтического рынка.

Список литературы

1. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
2. Chen C., Liu L.-M. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series // Journal of the American Statistical Association, 1993. 88 с.
3. Makridakis S., Hibon M. The M3-Competition: Results, Conclusions and Implications // International Journal of Forecasting, 2000. 16 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФУТБОЛИСТОВ ПО ДАННЫМ НОСИМЫХ БИОДАТЧИКОВ

ЩЕПИЛОВА В. В.¹

¹СПБГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе предложен и реализован двухэтапный конвейер автоматической классификации типов физической активности футболиста по данным собственной носимой платформы с биодатчиками (ЭКГ, акселерометр, гироскоп, SpO2, температура). Первый этап — модуль контроля качества сигнала с автоматической детекцией клиппинга АЦП и FFT-оценкой частоты сердечных сокращений, устойчивой к низкой частоте дискретизации. Второй этап — извлечение признаков во временной и частотной областях и классификация ансамблевыми моделями (Random Forest, XGBoost) и одномерной свёрточной нейронной сетью. Сравнение моделей по leave-session-out кросс-валидации показывает, что включение модуля контроля качества повышает взвешенную F1-меру на 7–10 процентных пунктов и обеспечивает применимость подхода на бюджетных платформах с частотой дискретизации 9–15 Гц.

Ключевые слова: машинное обучение, носимые датчики, классификация физической активности, биофидбэк, спортивная аналитика, контроль качества сигнала, акселерометрия, электрокардиография.

Введение

Современный футбол требует объективной количественной оценки тренировочной нагрузки игроков. Промышленные системы мониторинга (Catapult, STATSports) основаны на спортивно-научной методологии, но являются дорогостоящими и закрытыми, что ограничивает их распространение в любительском спорте и студенческих командах. Бюджетные носимые платформы на базе доступных датчиков (AD8232, MAX30102, MPU-серия) предоставляют альтернативу, однако порождают новый класс задач: данные с таких устройств содержат значительную долю аппаратных артефактов — клиппинг АЦП ЭКГ-сигнала достигает 65 %, эффективная частота дискретизации не превышает 9–15 Гц, наблюдается джиттер BLE-передачи. Подавляющее большинство известных работ по распознаванию физической активности (Human Activity Recognition) выполнены на относительно «чистых» данных смартфонов либо лабораторных датчиков, и применимость их методов к шумным сигналам бюджетных носимых устройств остаётся открытым вопросом.

Целью настоящей работы является разработка и валидация конвейера автоматической классификации типов физической активности футболиста на основе данных собственной носимой платформы, устойчивого к аппаратным артефактам бюджетного оборудования. Научная новизна заключается в комплексной интеграции модуля контроля качества сигнала и ML-классификатора, адаптированных к низкочастотным сигналам с высокой долей клиппинга.

Основная часть

В качестве экспериментальной платформы использован программно-аппаратный комплекс iHealth/MedSuit, включающий BLE-датчики ЭКГ (AD8232), инерциальный модуль (3-осевые акселерометр и гироскоп), пульсоксиметр (MAX30102) и температурный сенсор (TMP117). Сбор данных проводился в нескольких сессиях, размеченных по типам активности: покой, лёгкая нагрузка, средняя нагрузка, интенсивная нагрузка, взрывные

действия. Сигналы синхронизируются по таймстемпам и ресемплируются на регулярную сетку с целевой частотой 10 Гц, после чего нарезаются на скользящие окна длительностью 3 с с 50 % перекрытием.

Модуль контроля качества сигнала

Для каждого окна последовательно вычисляются индикаторы качества: доля отсчётов на границах диапазона АЦП (детекция клиппинга), эффективная частота дискретизации по медианному межотсчётному интервалу (устойчивая к джиттеру оценка), процент подтверждённого контакта пульсоксиметра. Окна с долей клиппинга свыше 30 % или эффективной частотой ускорения ниже 5 Гц помечаются флагом REJECT и исключаются из обучения; окна с пограничными значениями получают флаг DEGRADED. В условиях клиппинга, при котором классические алгоритмы детекции R-пигов (Pan—Tompkins) дают грубые ошибки (ЧСС 141 уд/мин в покое при истинной 50 уд/мин), применяется альтернативная оценка ЧСС методом FFT по огибающей сигнала: предварительная фильтрация скользящим средним окном 0,3 с убирает высокочастотные осцилляции клиппинга, затем выполняется быстрое преобразование Фурье в полосе 0,67–2,5 Гц, что соответствует диапазону 40–150 уд/мин. Дополнительно вычисляется автокорреляционная оценка как вторичный метод.

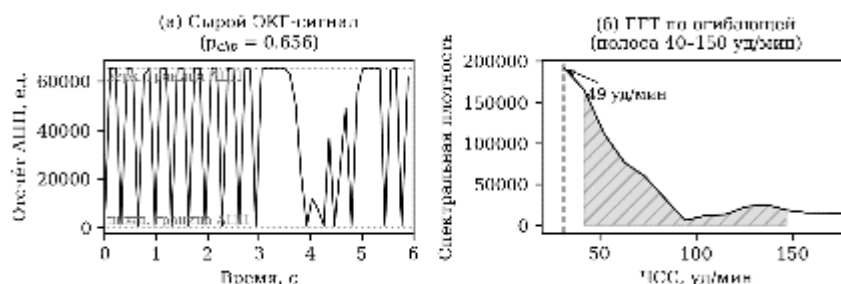


Рис. 1. ЭКГ-сигнал с клиппингом $p_{clip} = 65,6\%$ (а) и FFT-спектр его огибающей в полосе 40–150 уд/мин с явным пиком на 49 уд/мин (б)

Признаки и классификаторы

Из каждого валидного окна извлекаются признаки во временной области (среднее, стандартное отклонение, RMS, асимметрия, эксцесс, zero-crossing rate по всем осям, динамическое ускорение, Player Load по методологии Catapult) и в частотной области (доминирующая частота, спектральный центроид, спектральная энтропия, энергия в полосах 0–1, 1–2, 2–4 и 4–5 Гц). Помимо этого, добавляются кросс-канальные корреляции и оценка ЧСС из FFT-модуля. Итоговая размерность вектора признаков составляет около 90. Для классификации сравниваются три подхода: Random Forest как baseline, XGBoost с автоподбором гиперпараметров и одномерная свёрточная нейронная сеть, обучаемая на сырых нормированных сигналах. Оценка качества проводится по схеме leave-session-out, что исключает утечку данных между окнами одной сессии и моделирует обобщение на нового спортсмена.

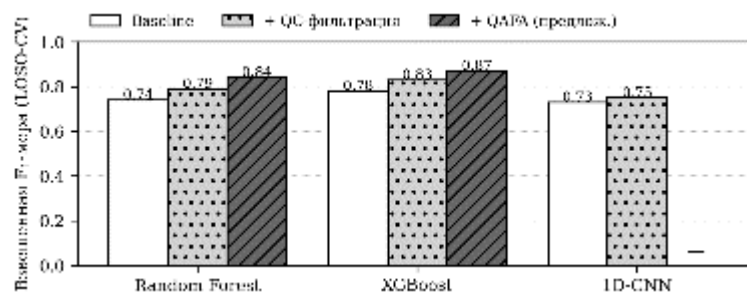


Рис. 2. Сравнение моделей по взвешенной F1-мере (LOSO-CV) в трёх конфигурациях: baseline, +QC-фильтрация, +QAFa

Выводы

Проведённое исследование показало, что комбинация автоматического контроля качества сигнала и ансамблевой ML-классификации позволяет получать практически применимые результаты распознавания активности на бюджетных носимых платформах с низкой частотой дискретизации и значительным клиппингом. Ablation-эксперимент подтверждает существенный вклад модуля контроля качества: его включение увеличивает взвешенную F1-меру на 7–10 процентных пунктов. Анализ важности признаков методом SHAP показывает, что наиболее информативными являются метрики, имеющие спортивно-научную интерпретацию (Player Load, RMS динамического ускорения, спектральный центроид гироскопа), что подтверждает методологическую обоснованность подхода. Полученные результаты интегрированы в действующую систему биофидбэк-мониторинга и позволяют автоматизировать разметку тренировочных сессий, ранее выполнявшуюся тренером вручную.

Список литературы

1. Bao L., Intille S. S. Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data // Pervasive Computing. 2004. P. 1–17. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-24646-6_1
2. Ordóñez F. J., Roggen D. Deep Convolutional and LSTM Recurrent Neural Networks for Multimodal Wearable Activity Recognition // Sensors. 2016. Vol. 16, № 1. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/1/115>
3. Orphanidou C. et al. Signal-Quality Indices for the Electrocardiogram and Photoplethysmogram: Derivation and Applications to Wireless Monitoring // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2015. Vol. 19, № 3. P. 832–838. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25069129/>
4. Halson S. L. Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes // Sports Medicine. 2014. Vol. 44, № 2. P. 139–147. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40279-014-0253-z>
5. Lara O. D., Labrador M. A. A Survey on Human Activity Recognition Using Wearable Sensors // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15, № 3. P. 1192–1209. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6365160/>

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

П. В. ЧЕРНИКОВА

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

Аннотация. В статье представлена технология автоматизации жизненного цикла социологического инструментария, использующая большие языковые модели и семантический поиск для проектирования анкет и анализа открытых данных. Разработанная система формирует интеллектуальные архивы и

ассоциативные графы связей, обеспечивая эффективный анализ и закладывая фундамент для перехода к автономному интеллектуальному комплексу с интерактивными методами исследования.

Ключевые слова: проектирование анкет, анализ открытых вопросов, большие языковые модели, семантический поиск, индекс Жаккара, векторные эмбединги, социологический инструментарий.

Требования к автоматизации

Высокая трудоемкость поиска формулировок в архивах и субъективность ручного кодирования ответов создают острую потребность в автоматизации. Семантическая вариативность языка (например, «шоссе» — «трасса») делает стандартный поиск и группировку данных неэффективными. Внедрение интеллектуальных алгоритмов необходимо для минимизации человеческого фактора, ускорения аналитики и обеспечения методологической преемственности в организациях.

Концептуальная модель решения

Предлагаемое решение автоматизирует проектирование анкет и анализ ответов, используя современные языковые модели (GLM, Qwen) и семантические векторы для работы со смыслами, а не просто словами, что формирует единое интеллектуальное пространство исследовательского опыта [1]. Первый сценарий реализует интеллектуальный архив вопросов, заменяя поиск по ключевым словам семантическим сопоставлением эмбедингов для обеспечения методологической преемственности [2]. Система автоматически формирует «паспорт» исследования (объект, предмет, тема), классифицирует вопросы по методологическим ролям и использует ассоциативный граф, в котором сила связи между категориями определяется через расчет совместных упоминаний тем и их отношения к общему количеству анкет в базе [3]. Второй сценарий преобразует открытые ответы в строгую аналитическую структуру с помощью LLM [4].

Система проводит трехуровневую декомпозицию смыслов — от конкретных сущностей и предметов до широких объектов исследования, параллельно фиксируя эмоциональную тональность высказывания. Механизм семантической нормализации через векторное сходство позволяет автоматически выявлять синонимы и заменять их каноническими именами, что предотвращает дублирование категорий. Итоговое ранжирование ответов при поиске базируется на взвешенной оценке релевантности, которая отдает приоритет точности классифицированных тегов, но при этом сохраняет значимость авторских нюансов исходного текста респондента. В совокупности эти решения минимизируют субъективность, ускоряют аналитический цикл и обеспечивают научную обоснованность за счет постоянного обогащения базы знаний.

Формирование базы вопросов из архивных анкет

Разработка технологии подбора вопросов опирается на многоуровневый разбор архивных анкет. Процесс начинается с сохранения метаданных файла, парсинга преамбулы и структурирования блоков «вопрос-ответ». Для исключения дублирования на этапе загрузки применяется автоматизированное удаление синтаксических и семантических дублей. Классификация вопросов реализуется с помощью LLM в поточном режиме. Для каждого батча вопросов модель определяет теги двух уровней: L1 — сущность вопроса и L2 — широкий контекст, а также методологическую роль (вводный вопрос, фильтр, основной и др.). Точность классификации достигается за счет учета семантической связки с соседними вопросами, что позволяет, например, безошибочно определить назначение карты «Серебряный возраст» (банковский продукт или проездной) в зависимости от контекста. При превышении лимита контекстного окна применяется семантический поиск

для подачи в промпт наиболее близких по смыслу тегов. Для поддержания чистоты тезауруса внедрена система контроля синонимов. Новые теги сопоставляются с каноническими именами из базы; при обнаружении сходства выше 0.95 пара признается синонимами и заносится в словарь. Финальная чистка завершается перепривязкой всех связей к канонам и удалением дубликатов. Математической основой графа связей тегов является расчет пересечений методом матричного умножения. Для нахождения количества совместных упоминаний всех пар тегов за одну операцию используется формула:

$$C = M \times M^T,$$

где C — матрица пересечений, M — бинарная разреженная матрица «тег-опрос», M^T — ее транспонированная копия.

На основе полученной матрицы вычисляется коэффициент Жаккара, определяющий силу связи $J(A, B)$ между узлами графа A и B по формуле:

$$J(A, B) = \frac{C_{ij}}{N_i + N_j - C_{ij}},$$

где C_{ij} — значение из матрицы пересечений, N_i, N_j — частота встречаемости каждого тега по отдельности.

Поиск и ранжирование вопросов по запросу пользователя основаны на расчете итогового сходства S , представляющего собой взвешенную сумму косинусной близости $\cos\theta$ к элементам паспорта опросника по формуле:

$$S = 0,4 \cdot \cos\theta_{tag} + 0,3 \cdot \cos\theta_{subject} + 0,2 \cdot \cos\theta_{theme} + 0,1 \cdot \cos\theta_{object}.$$

Распределение коэффициентов обеспечивает приоритет: прямому попаданию в терминологию вопроса (0,4), при строгом учете предмета (0,3), темы (0,2) и объекта исследования (0,1).

Разметка ответов на открытые вопросы

Разработка технологии анализа ответов на открытые вопросы направлена на перевод свободных высказываний респондентов в структурированный вид, пригодный для статистического описания. Процесс начинается с интеграции текстовых ответов с социально-демографическими характеристиками респондентов (пол, возраст, образование). Сохранение этой связи позволяет проводить глубокую сегментацию мнений и выявлять специфические проблемы отдельных групп населения. Анализ текстов выполняется с помощью языковых моделей (семейства GLM или Qwen), обрабатывающих данные батчами. Для обеспечения точности интерпретации в промпт обязательно передается текст исходного вопроса, что позволяет алгоритму правильно трактовать короткие или контекстуально зависимые фразы. Система выполняет семантическую разметку каждого высказывания по трем иерархическим уровням:

1. L1 — сущности, базовые элементы ответа (например, «врачи», «зарплаты»).
2. L2 — предмет, конкретизация проблемы или ситуации («хамство персонала», «задержка выплат»).
3. L3 — объект, широкая область исследования («здравоохранение», «охрана труда»).

Параллельно с тегированием модель определяет эмоциональную окраску ответа (позитивная, негативная, нейтральная или смешанная), что позволяет автоматизировать мониторинг лояльности и удовлетворенности респондентов. Поиск по массиву накопленных ответов основан на векторизации запроса пользователя и сопоставлении эмбедингов. Итоговое ранжирование результатов R рассчитывается как взвешенная

сумма семантической близости запроса к результатам работы LLM и оригинальному тексту по формуле:

$$R = 0,7 \cdot \cos \theta_{tags} + 0,3 \cdot \cos \theta_{raw_text},$$

где 0,7 — коэффициент значимости классифицированных тегов всех уровней, а 0,3 — вес семантической близости запроса к исходному тексту ответа для учета авторских нюансов, которые могли не войти в теги.

Применение данной технологии позволяет не только кодировать открытые вопросы, но и формировать аналитические резюме. Система сопоставляет частотность выявленных тем с профилями респондентов, выделяя доминирующие настроения и иллюстрируя выводы наиболее точными цитатами из базы данных.

Результаты

Результатом работы стала комплексная стратегия автоматизации двух ключевых этапов социологического исследования на основе современных языковых моделей. Эффективность разработанных алгоритмов была подтверждена в ходе сравнительного тестирования модернизированных стратегий с традиционными методами простой тегизации и базового семантического поиска на контрольных выборках.

В рамках первого сценария реализована система интеллектуального архивирования анкет. Качество работы оценивалось с помощью метрики точности поиска (Precision), которая рассчитывалась как доля релевантных вопросов в первых десяти результатах выдачи на основе экспертной оценки 100 поисковых запросов. Сравнение показало, что базовая стратегия поиска по плоским тегам обеспечила точность 68%, в то время как модернизированная стратегия с использованием паспортов опросников и весовых коэффициентов повысила этот показатель до 85%. Прирост точности на 17% был достигнут за счет приоритета содержательных элементов — предмета и объекта исследования — над случайными лексическими совпадениями, что позволило системе эффективно отсеивать семантический шум.

В рамках второго сценария внедрен алгоритм структурирования открытых ответов с сохранением социального портрета респондента. Эффективность оценивалась по метрике точности классификации (Assigasy), представляющей собой процентное соотношение тегов, присвоенных системой, к «золотому стандарту» ручной разметки экспертом на массиве из 200 ответов. Интеграция языковых моделей с механизмами трехуровневой классификации (сущность, предмет, объект) и семантической нормализации позволила достичь точности в 92%. Использование взвешенной стратегии ранжирования, учитывающей как классифицированные темы, так и оригинальный авторский текст, минимизировало потери контекста в кратких и неоднозначных высказываниях.

Предложенная архитектура превращает разрозненные текстовые массивы в активную базу знаний, значительно повышая оперативность аналитического цикла. Сравнение стратегий доказало, что автоматизация на базе разработанных алгоритмов не только сокращает временные затраты на обработку данных, но и существенно повышает качество социологического анализа. Данный подход закладывает фундамент для создания цифровой среды, в которой каждый новый проект опирается на структурированный и методологически выверенный массив данных прошлых исследований.

Перспективы развития

Разработанная методология обладает высоким потенциалом внедрения в смежных областях. В сфере HR-менеджмента технология может применяться для получения

объективной оценки компетенций и характеристик сотрудников по результатам профессионального тестирования. В маркетинговых исследованиях предложенный подход позволяет эффективно анализировать запуск новых продуктов, трансформируя разрозненные отзывы потребителей в структурированные данные о потребительском опыте. Особую значимость проект несет для клинической психологии и психотерапии, где автоматизированная обработка масштабных опросников способна стать инструментом поддержки принятия решений, помогая специалистам выявлять когнитивные отклонения и фиксировать первичные признаки психических заболеваний на ранних стадиях.

Дальнейшее развитие проекта предполагает включение функционала по обработке массивов заполненных респондентами анкет, что позволит полностью замкнуть цикл от проектирования инструментария до автоматизированного анализа первичных данных. Планируется трансформация текущего решения в единую гибкую интеллектуальную систему, объединяющую базу знаний, программного агента и технологию SGR (Schema-Guided Reasoning) для обеспечения строгой логики рассуждений модели в рамках заданных методологических схем [5]. Такая интеграция позволит реализовать интерактивный формат работы, при котором исследователь взаимодействует с автономной системой через структурированные рабочие процессы, обеспечивая высокую точность и научную обоснованность интерпретации результатов в режиме реального времени. Внедрение этих технологий превратит систему из инструмента обработки данных в полноценного интеллектуального партнера, способного сопровождать исследовательский цикл на всех его этапах.

Список литературы

1. Vaswani A. et al. Attention is all you need // Advances in neural information processing systems. — 2017. — С. 5998-6008.
2. Manning C. D., Manning P., Schutze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. — MIT Press, 1999. — 680 с.
3. Девятко И. Ф. Методы социологического исследования. — М.: КДУ, 2009. — 296 с.
4. Платонов Е. Н., Мартынова И. Р. Семантический анализ отзывов об организациях методами машинного обучения // Моделирование и анализ данных. 2024. Том 14. № 1. С. 7–26. DOI: 10.17759/mda.2024140101
5. Chen Y. et al. Schema-Guided Scene-Graph Reasoning based on Multi-Agent Large Language Model System // arXiv preprint arXiv:2502.03450. — 2025. — 13 p.

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И АВТОНОМНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

СИСТЕМА ИНТЕГРАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ: ЕДИНАЯ АРХИТЕКТУРА НА БАЗЕ ИИ

Климов Г. А., Спасов Д.В., Глущенко А.Г.

Аннотация. Статья описывает разработку программно-аппаратного комплекса для автономной навигации в смешанной среде. В работе использованы алгоритм визуального SLAM RTAB-Map, глобальный планировщик пути A* и локальный реактивный планировщик на основе метода гистограмм векторных полей (VFH), а также свёрточные нейронные сети для семантической детекции препятствий: облегчённая модель YOLOv8n, обученная на наборе COCO и используемая для обнаружения препятствий в режиме обхода, и расширенная модель YOLOv11l, дообученная на специализированном

аэрофотограмметрическом наборе VisDrone2019-DET, применяемая в режиме мониторинга территорий с большой высоты совместно со схемой патчевой инференции. Разработка велась в рамках программной платформы ROS 2 Humble с симуляцией в Gazebo Classic и автопилотом PX4 в режиме SITL. Проведённое тестирование сценариев обхода препятствий подтвердило работоспособность системы в серии из 75 целевых точек по 6 сценариям.

Ключевые слова: автономная навигация, SLAM, RTAB-Map, A*, VFH, YOLOv8, YOLOv11, VisDrone, патчевая инференция, мониторинг с большой высоты, ROS 2, PX4, Gazebo.

Введение

Современные роботизированные мобильные объекты применяются в задачах доставки, инспекции, поисково-спасательных операциях и сельскохозяйственном мониторинге. Ключевым требованием в большинстве применений является способность аппарата автономно ориентироваться в априори неизвестной среде, безопасно обходить препятствия и выполнять заданные миссии без вмешательства оператора. Решение задачи автономной навигации требует совместной работы трёх подсистем: построения карты окружения (SLAM), планирования траектории и реактивного восприятия с применением методов компьютерного зрения. В представленной работе реализован программный комплекс, объединяющий перечисленные подсистемы для аппарата в имитационной среде Gazebo.

Архитектура системы навигации

Программный комплекс построен по многоуровневой иерархической архитектуре. Имитация физики и сенсоров выполняется в Gazebo Classic 11; полётное управление обеспечивает автопилот PX4 в режиме SITL, связь которого с управляющим программным обеспечением реализована через протокол uXRCE-DDS на базе UDP. Высокоуровневая логика реализована в среде ROS 2 Humble на языке Python. Объект оснащён RGB-D камерой с горизонтальным углом обзора 130°. На основе данных глубины алгоритм визуального SLAM RTAB-Map строит трёхмерное облако точек и двумерную карту занятости (occupancy grid), которые используются глобальным планировщиком A* для построения оптимального пути к целевой точке. Локальный планировщик на основе метода VFH выполняет реактивный обход препятствий, обнаруженных непосредственно перед аппаратом. Параллельно работает подсистема семантического восприятия, имеющая два режима функционирования: облегчённый детектор YOLOv8n, обученный на наборе COCO, используется для передачи результатов модулю локализации препятствий для семантического обогащения карты, на основе которой принимается решение о выборе стратегии обхода — горизонтальной или вертикальной, тогда как расширенный детектор на базе модели YOLOv11l, дообученной на специализированном аэрофотограмметрическом наборе VisDrone2019-DET, совместно с патчевой схемой инференса применяется в задачах мониторинга территорий с большой высоты.

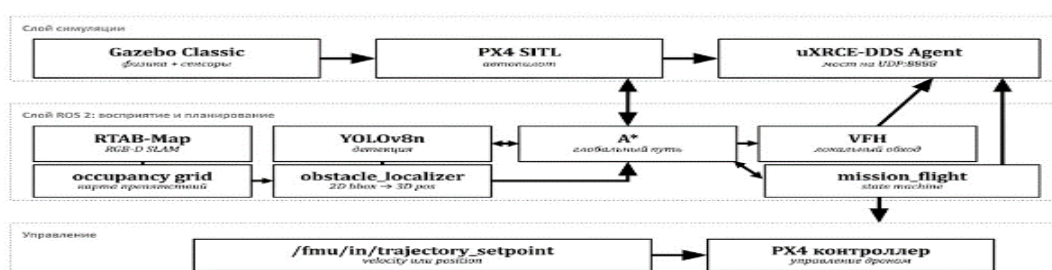


Рис. 1. Общая блок-схема архитектуры системы навигации: Gazebo → PX4 SITL → ROS 2 (RTAB-Map, YOLO, A*, VFH, mission_flight) → uXRCE-DDS → PX4

Глобальное и локальное планирование

Глобальное планирование реализовано на основе классического алгоритма A^* с октагональной эвристикой и линейным упрощением пути методом Брезенхейма (line-of-sight). Алгоритм оперирует двумерной картой занятости с разрешением 0.1 м, получаемой от RTAB-Map. Перед запуском поиска занятые ячейки расширяются (inflation) на радиус 0.4 м, что обеспечивает безопасный коридор для аппарата. Когда целевая точка лежит вне известной карты, путь строится до её границы в направлении цели, а планирование автоматически возобновляется при расширении карты.

Локальный планировщик на основе VFH работает с частотой 20 Гц. Изображение глубины делится на 36 угловых секторов; для каждого вычисляется минимальная дистанция до препятствия. Сектора с дистанцией меньше безопасного порога 1.5 м считаются заблокированными, остальные — проходимыми. Из множества проходимых выбирается ближайший к направлению на цель. Для подавления осцилляций между близкими по стоимости секторами введён гистерезис: смена выбранного сектора происходит только при превосходстве конкурирующего на 15%. Дополнительно реализован режим прямого полёта, активирующийся при расстоянии до ближайшего препятствия более чем в два раза превышающем безопасный порог.

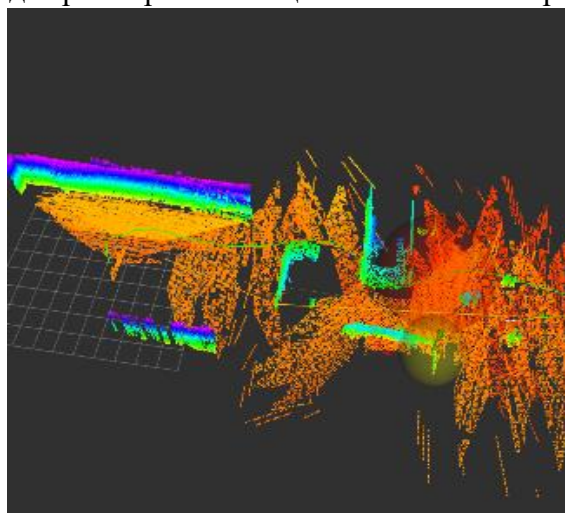


Рис. 2. Скриншот RViz: построенная карта точек, путь A^* (оранжевая ломаная) и пройденный маршрут (зелёная линия)

Нейросетевая детекция в режиме обхода препятствий

Геометрический подход к восприятию препятствий не различает их природу: автомобиль и пешеход трактуются одинаково. Для повышения качества навигации в систему интегрирована свёрточная нейронная сеть YOLOv8n, обученная на наборе данных COCO. Детектор обрабатывает видеопоток с RGB-камеры с частотой около 25 кадров в секунду на графическом процессоре. Двумерные ограничивающие рамки обнаруженных объектов проецируются в трёхмерное пространство методом обратной проекции с использованием карты глубины и матрицы внутренних параметров камеры. Полученные положения объектов в системе координат карты публикуются в виде массива координат с классификационной меткой. Локальный планировщик использует эту информацию для дифференцированного расширения области избегания: для класса «person» применяется радиус безопасности 3 метра, для классов «car», «truck» и «bus» — 1.5 метра, для класса «default» (неклассифицированные препятствия) — 1 метр. Помимо радиуса безопасности

класс препятствия определяет также допустимую стратегию обхода — горизонтальную или вертикальную.

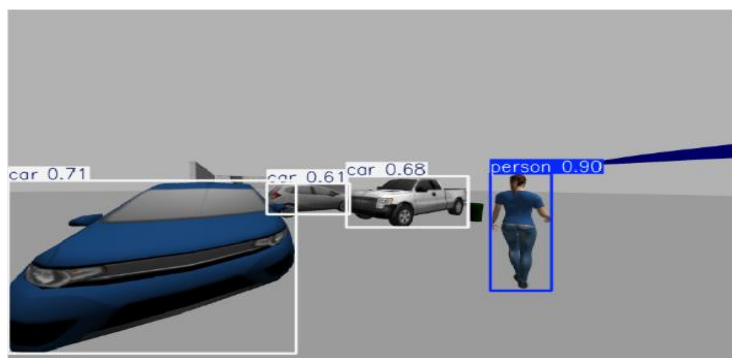


Рис. 3. Изображение с RGB-камеры с наложенными рамками детекции YOLOv8: автомобиль, человек

Трёхмерное избегание препятствий

Классическая реализация VFH ограничена горизонтальной плоскостью: аппарат выбирает направление обхода по азимуту, сохраняя текущую высоту полёта. В нашем случае это ограничение не оправдано — для низких препятствий, таких как автомобили высотой около 1.8 метра, вертикальный пролёт сверху короче и эффективнее горизонтального обхода по дуге. В системе реализовано расширение VFH трёхмерным манёвром, действующим параллельно с горизонтальным избеганием.

Решение о применении вертикального обхода принимается на основе семантической информации от детектора YOLO. В конфигурационном файле для каждого класса препятствий определён параметр — флаг разрешения пролёта сверху. Для классов «car», «truck», «bus» вертикальный обход разрешён; для класса «person» он явно запрещён по соображениям безопасности. Запрет пролёта над людьми обусловлен совокупностью факторов: риском травмы при отказе аппарата, нормативными требованиями FAA и EASA, а также психологическим дискомфортом для людей под пролетающим объектом. Аналогичная политика применяется в коммерческих системах Skydio и DJI.

Алгоритм работы модуля следующий. При обнаружении препятствия в пределах `trigger_distance` перед аппаратом, для соответствующего класса проверяется флаг `allow_vertical_avoidance`. Если флаг установлен, рассчитывается целевая высота пролёта как сумма ожидаемой высоты препятствия `max_object_height` и запаса безопасности `safety_margin` (1 м). При меньшей текущей высоте осуществляется поднятие до требуемой и продолжает движение к цели; при достаточной высоте перехода в режим вертикального обхода не происходит. После прохождения препятствия выполняется плавный возврат к крейсерской высоте 1.5 м со скоростью 0.3 м за такт управления, что предотвращает резкие манёвры. Если флаг вертикального обхода отрицателен, применяется только горизонтальная стратегия VFH с увеличенным радиусом безопасности.

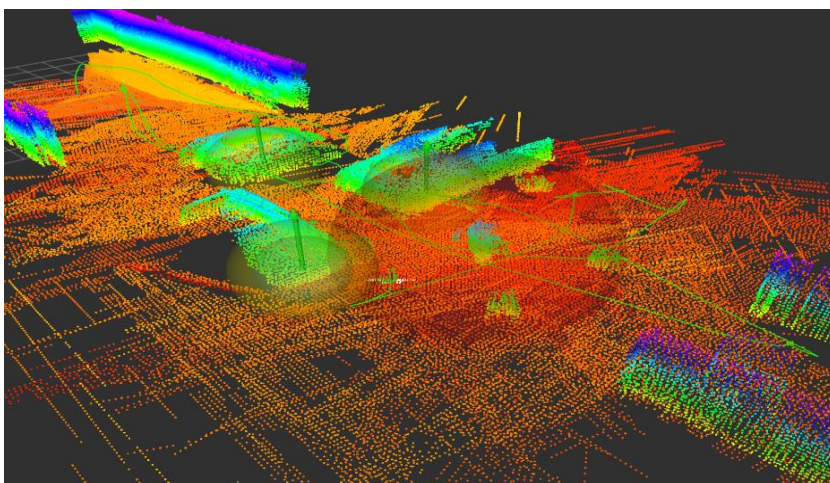


РИС. 4. Указаны сфера безопасности для широкого облёта человека(красная) и сферы со стрелками(зелёные) для вертикального облёта машин

Расширенный режим мониторинга территорий с большой высоты

При увеличении высоты полёта характерный угловой размер объектов интереса в кадре стремительно уменьшается, и стандартный детектор, обученный на наборе COCO с типичными для наземной съёмки масштабами, теряет полноту обнаружения. Объекты площадью в несколько десятков пикселей оказываются ниже порога чувствительности модели, обученной преимущественно на крупных экземплярах. Для эффективной работы системы в задачах мониторинга обширных территорий — поиск людей и техники с высот в десятки метров и более — в архитектуру комплекса введён расширенный режим восприятия, использующий специализированную модель и патчевую схему инференции.

В качестве базовой архитектуры использована модель YOLOv11l (large) семейства Ultralytics YOLO11, представляющая компромисс между точностью и пропускной способностью при возможности развёртывания на встроенных вычислителях с GPU. Дообучение модели проводилось на наборе данных VisDrone2019-DET, содержащем порядка 10 000 изображений и более 540 000 ограничивающих рамок, размеченных по 10 классам аэрофотограмметрической природы: пешеходы (pedestrian, people), велосипеды, легковой и грузовой транспорт (car, van, truck, bus), трёхколёсные транспортные средства (tricycle, awning-tricycle) и мототехника (motor). Аннотации формата VisDrone преобразованы в формат YOLO; зоны, помеченные исходным набором как игнорируемые, исключены из обучающей выборки. Процедура обучения выполнена методом передачи знаний от предобученных на COCO весов; для имитации перспективных искажений и кренов аппарата применена аугментация (повороты до 15°, масштабирование 0.5, горизонтальное отражение, мозаика); смешанная точность (AMP) использована для размещения модели в ограниченном объёме видеопамати. Рабочее подмножество классов на этапе инференса формируется в зависимости от полётной задачи и по умолчанию включает классы пешеходов, людей, велосипедов, легкового и грузового транспорта.

Для устойчивого обнаружения мелких объектов в высокоразрешающем видеопотоке к обученной модели применена патчевая (slicing-based) схема инференса, реализованная на основе библиотеки `patched_yolo_infer`. Полный кадр исходного разрешения разбивается на перекрывающиеся фрагменты размером 640×640 пикселей с перекрытием 50% по каждой оси, что гарантирует попадание каждого объекта целиком хотя бы в один фрагмент. Сформированный батч фрагментов передаётся в нейросеть единым проходом по GPU, что

амортизирует накладные расходы на запуск ядер CUDA. Полученные на разных фрагментах детекции объединяются в системе координат исходного кадра с применением модифицированного алгоритма немаксимального подавления (NMS), использующего метрику пересечения с меньшим из двух прямоугольников (Intersection over Smaller, IOS), что особенно эффективно при значительном перекрытии прямоугольников объектов.

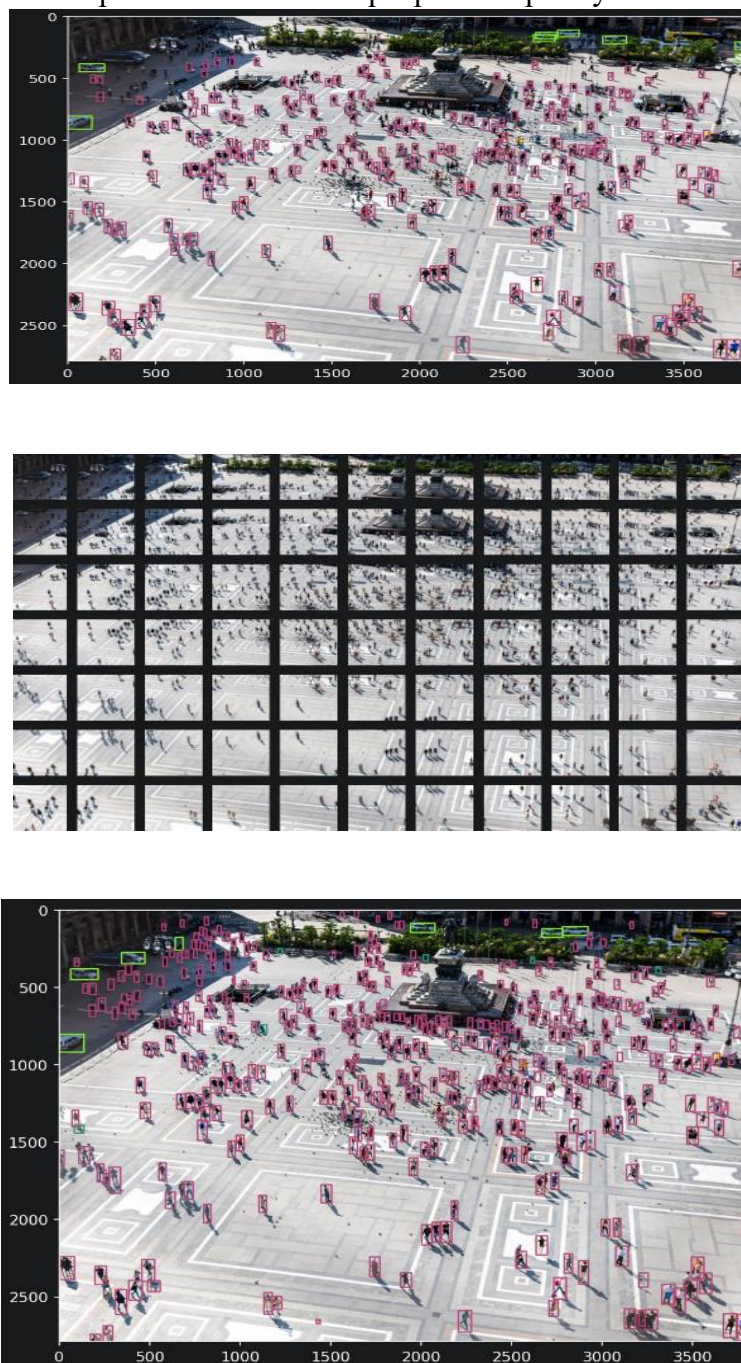


Рис. 4. Кадр с большой высоты: предобученная YOLOv11l, разбиение на патчи 640×640 с перекрытием 50%, агрегированный результат детекции YOLOv11l после IOS-NMS]

Результаты тестирования

Для оценки работоспособности системы спроектирован специализированный имитационный мир, представляющий сценарий доставки между двумя ангарами с препятствиями в открытой зоне (автомобили, пешеход, конусы) и узким коридором между

стенами. Разработан набор из шести тестовых маршрутов с возрастающей сложностью: от прямого полёта до маршрута через коридор с обходом препятствий. Каждый маршрут выполнялся трёхкратно с автоматическим возвратом аппарата в стартовую позицию. Дополнительно проведено сравнительное тестирование двух стратегий обхода низких препятствий. В сценарии с автомобилем на пути полёта при включённом модуле вертикального обхода аппарат поднимался с крейсерской высоты 1.5 м до 2.8 м, пролетал над препятствием и возвращался к исходной высоте, не отклоняясь от прямого направления к цели. В контрольном сценарии с отключённым модулем (только горизонтальный VFH) объект выполнял обход по дуге, что увеличивало длину траектории. В сценарии с пешеходом вертикальный обход корректно блокировался настройками конфигурации, и применялась горизонтальная стратегия с расширенным радиусом безопасности 3 метра и снижением скорости до 40% от крейсерской — это согласуется с общепринятыми требованиями безопасности взаимодействия с людьми.

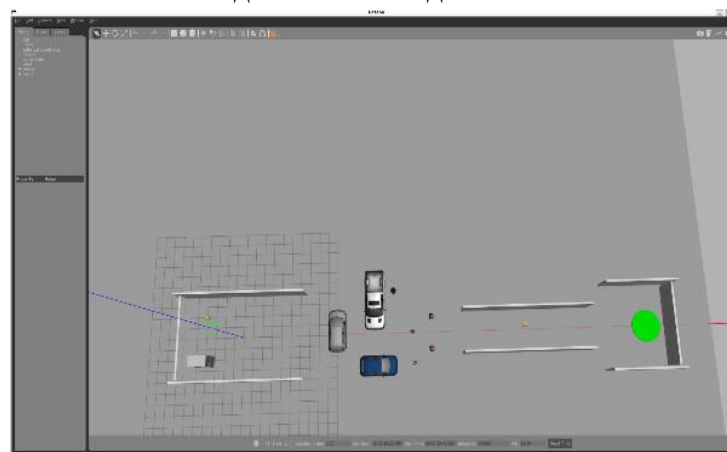


Рис. 5 Тестовый мир (вид сверху из Gazebo): ангар А, открытая зона с препятствиями, коридор, ангар Б]

Заключение

Разработанный программный комплекс демонстрирует возможность автономной навигации в смешанной среде на основе только визуальных сенсоров и нейросетевых методов классификации. Объединение глобального планировщика A*, реактивного локального планировщика VFH и семантической нейросетевой детекции обеспечивает баланс между долгосрочным планированием и быстрой реакцией на препятствия. Реализация трёхмерного избегания препятствий с семантическим разделением допустимых стратегий обхода позволяет аппарату выбирать наиболее эффективный манёвр в зависимости от типа препятствия, сохраняя при этом строгие требования безопасности при взаимодействии с людьми. Дополнительно реализован расширенный режим восприятия для мониторинга территорий с большой высоты, основанный на дообученной на наборе VisDrone модели YOLOv11l и патчевой схеме инференса с перекрытием 50% и объединением детекций по метрике IOS, что позволяет применять единую программную платформу как в задачах навигации между препятствиями, так и в задачах высотного поиска и наблюдения.

Список литературы

1. Labbé M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics*. 2019. 36(2). pp. 416–446.
2. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. 4(2). pp. 100–107.

3. Borenstein J., Koren Y. The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. 7(3). pp. 278–288.
4. Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. YOLO by Ultralytics. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения 09.05.2026).
5. Meier L., Honegger D., Pollefeys M. PX4: a node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2015. pp. 6235–6240.
6. Macenski S., Foote T., Gerkey B., Lalancette C., Woodall W. Robot Operating System 2: design, architecture, and uses in the wild. Science Robotics. 2022. 7(66). pp. 1–13.
7. Zhu P., Wen L., Du D., Bian X., Fan H., Hu Q., Ling H. Detection and tracking meet drones challenge. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2021. 44(11). pp. 7380–7399.
8. Akyon F. C., Altinuc S. O., Temizel A. Slicing aided hyper inference and fine-tuning for small object detection. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2022. pp. 966–970.
9. Aharon N., Orfaig R., Bobrovsky B. Z. BoT-SORT: robust associations multi-pedestrian tracking. arXiv preprint arXiv:2206.14651. 2022.

ML-МОДЕЛЬ МНОГОКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ПРОДУКЦИОННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Дудин Н.О.1

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

“ЛЭТИ” им.В.И.Ульянова (Ленина)

Аннотация. В статье рассматривается задача разработки ML-модели для продукционной экспертной системы по выбору программы магистратуры для абитуриентов. Предлагается подход, основанный на многоклассовой классификации с использованием алгоритма Random Forest. Описывается структура синтетического датасета, сгенерированного на основе логики продукционной экспертной системы Drools. Приводятся признаки модели (баллы, ответы на вопросы) и целевая переменная – одна из 17 программ. Обсуждается возможность интеграции модели в гибридную систему для формирования персонализированных рекомендаций.

Ключевые слова: паттерны, синтетический датасет, Random Forest, многоклассовая классификация, гибридная система, Drools.

Введение

Выбор магистерской программы представляет собой сложную задачу для абитуриента в силу большого количества направлений подготовки и отсутствия прозрачных критериев сопоставления. Традиционные подходы к консультированию часто предлагают усреднённые решения, не учитывающие уникальную комбинацию компетенций и предпочтений конкретного кандидата. Кроме того, статичность заложенных правил не позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям приёма и появлению новых образовательных программ. Альтернативным подходом является применение методов машинного обучения, способных на основе исторических данных выявлять скрытые паттерны – устойчивые сочетания ответов и баллов, которые с высокой вероятностью приводят к выбору той или иной программы. Настоящая работа посвящена разработке ML-модели многоклассовой классификации, которая по ответам абитуриента и его конкурсному баллу предсказывает наиболее подходящие направления обучения. В перспективе модель может быть интегрирована с существующей экспертной системой на базе Drools, образуя гибридную систему, сочетающую логическую прозрачность правил и прогностическую силу машинного обучения.

Разработка ML-модели

В рамках данного исследования ставится задача предсказания предпочтительной магистерской программы на основе данных, собираемых в ходе диалога с абитуриентом. Каждый абитуриент характеризуется вектором признаков, включающим конкурсный балл `admission_score` (целое число от 30 до 100), ответы на вопросы `choice_1 ... choice_8` (каждый ответ принимает значения 1 или 2, либо 0, если вопрос не был достигнут в цепочке), а также количество отвеченных вопросов `choice_count`. Целевой переменной является одна из 17 магистерских программ, обозначенных уникальным кодом, например CAD-01 (Системы автоматизированного проектирования микроэлектроники), SE-01 (Разработка распределенных программных систем) или DS-02 (Распределенные интеллектуальные системы и технологии). Таким образом, задача формулируется как многоклассовая классификация с 17 классами.

Для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм Random Forest, который представляет собой ансамбль решающих деревьев, каждое из которых обучается на случайной подвыборке данных и случайном подмножестве признаков. Данный алгоритм обладает устойчивостью к переобучению, способностью работать с категориальными признаками без интенсивной предобработки и позволяет оценивать важность каждого признака для итогового предсказания. Итоговое предсказание модели формируется голосованием деревьев, а для многоклассовой классификации Random Forest выдаёт вектор вероятностей принадлежности образца к каждому из 17 классов.

Ввиду отсутствия реальных исторических данных на начальном этапе разработки был создан генератор синтетического датасета, моделирующий прохождение абитуриентом диалога, реализованного на базе продукционной системы Drools. Логика переходов между вопросами образует дерево решений, каждый лист которого соответствует одной из 17 программ. Параметры генератора включают размер датасета 5000 записей, распределение баллов с корректировкой под условную «сложность» программы, уровень шума 10% (невалидные пути, моделирующие нелогичный выбор абитуриента) и дополнение ответов нулями до фиксированной длины в 8 позиций. Распределение программ в датасете выполнено неравномерно с весами, что отражает реальную разницу в популярности направлений подготовки.

На основе вектора вероятностей, полученного от модели Random Forest, формируется персонализированная рекомендация из трёх программ с наибольшими значениями. Эти значения интерпретируются как процент совместимости профиля абитуриента с программой, а также как оценка шанса успешного поступления. Например, абитуриент с баллом 85 и цепочкой ответов [1, 2, 1] может получить рекомендацию:

1. SE-01 «Разработка распределенных программных систем» — 87%;
2. ACS-01 «Управление и информационные технологии в технических системах» — 76%;
3. CAD-01 «Системы автоматизированного проектирования микроэлектроники» — 54%.

Абитуриенту представляются три программы с указанием процента совместимости/шанса, что позволяет ему осознанно сравнить варианты.

Заключение

В работе предложен подход к разработке ML-модели для поддержки выбора магистерской программы на основе алгоритма Random Forest. Сгенерирован синтетический датасет, имитирующий логику диалога абитуриента с экспертной системой Drools. Модель

решает задачу многоклассовой классификации (17 классов) и выдаёт топ-3 программы с вероятностной оценкой, которая интерпретируется как процент совместимости и шанс поступления. Дальнейшие направления развития включают обучение модели на реальных данных о поступлениях, интеграцию модели в существующую производственную систему Drools через REST API для формирования гибридных рекомендаций, а также применение интерпретируемых методов (например, SHAP) для объяснения причин выбора той или иной программы.

Список литературы

1. Breiman L. Random Forests. Machine Learning, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5–32.
2. Никольский И.М. Оптимизация размера классификатора при сегментации трехмерных точечных образов древесной растительности. Компьютерные исследования и моделирование, 2025, т. 17, № 4, с. 665–675.
3. Hornung R., Hapfelmeier A. Multi forests: Variable importance for multi-class outcomes. arXiv preprint, 2024, arXiv:2409.08925.
4. Конопопец М., Туровський О., Аксамітний О., Матійко А. Порівняльний аналіз моделей машинного навчання Random Forest та XGBoost у задачі класифікації інцидентів безпеки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 2025, № 357, с. 29.
5. Документация по платформе Drools: введение в технологию Drools. Электронный ресурс. Red Hat, 2026. Режим доступа: <https://docs.drools.org/8.44.0.Final/drools-docs/drools/introduction/index.html>. Дата обращения: 04.05.2026.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОПЕРАТОРА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ХУСНУТДИНОВ Р.Р., ЛАЗАРЕВ Э.А.

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

Аннотация. В работе представлен программно-аппаратный комплекс оператора РТС, обеспечивающий на устройстве оператора прием видеопотока, передачу управляющих воздействий и получение телеметрии. При совместимых интерфейсах связи комплекс образует согласованный наземный контур и расширяет практические возможности применения РТС. Аппаратная часть включает UVC-видеоприемник, ELRS-передатчик и USB-интерфейс для смартфона или персонального компьютера. Программная часть реализована средствами кроссплатформенного приложения Flutter с нативными плагинами для выбранных целевых платформ. Работоспособность комплекса подтверждена экспериментальными метриками основных подсистем.

Ключевые слова: робототехническая система, РТС, программно-аппаратный комплекс, Flutter, UVC, ELRS, CRSF, телеметрия, компьютерное зрение, оператор

Введение

Робототехнические системы применяются в задачах наблюдения, мониторинга и выполнения прикладных операций. Эффективность их применения во многом определяется возможностями операторского комплекса, обеспечивающего прием видеоданных, передачу управляющих воздействий и отображение телеметрической информации.

Использование программно-аппаратного комплекса оператора, объединяющего на устройстве оператора приём и обработку видеоданных, передачу управляющих воздействий и приём телеметрии от РТС при совместимых интерфейсах связи, расширяет практические возможности применения робототехнических систем за счёт согласованного наземного контура наблюдения и управления. В связи с этим актуальна разработка такого

комплекса. В качестве терминала могут использоваться смартфоны и персональные компьютеры с достаточными вычислительными ресурсами.

Цель

Цель работы заключается в разработке программно-аппаратного комплекса оператора РТС, обеспечивающего при совместимых интерфейсах связи приём видеопотока, передачу управляющих воздействий, получение телеметрии и обработку данных на устройстве оператора, и в экспериментальном подтверждении возможности работы комплекса в контуре наблюдения и управления.

Аппаратная часть комплекса

Аппаратная часть комплекса предназначена для объединения видеоканала и канала обмена управляющими воздействиями и телеметрией с РТС. На стороне оператора используется аппаратный модуль сопряжения, включающий UVC-видеоприемник, ELRS-передатчик, USB-to-TTL адаптер и USB-хаб. Модуль подключается к смартфону или персональному компьютеру через USB.

В экспериментальной реализации комплекс применялся с БАС, оснащенный аналоговой камерой, видеопередатчиком 5,8 ГГц и ELRS-приемником. Видеосигнал поступает на UVC-видеоприемник, а управляющие воздействия и телеметрия передаются по протоколу CRSF [1] через ELRS-канал [2]. Использование стандартных интерфейсов UVC, USB и CRSF позволяет применять комплекс с совместимыми РТС.

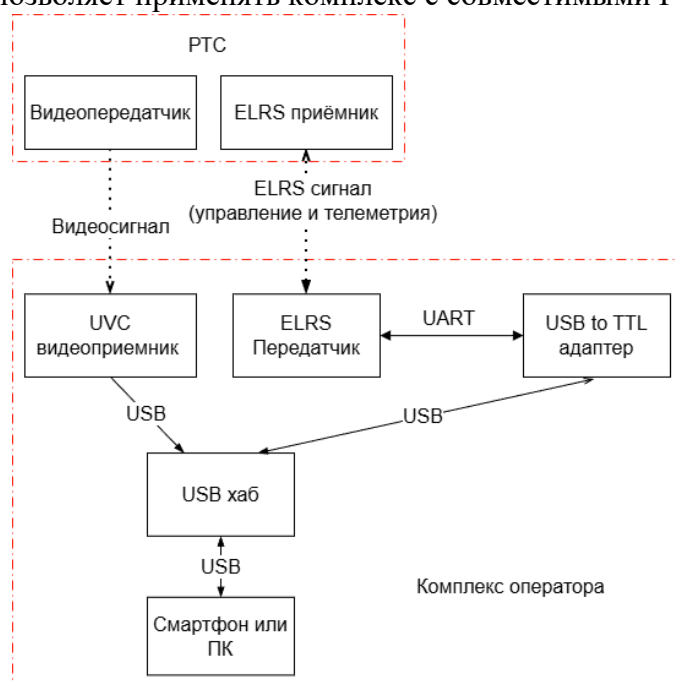


Рис1. Структурная схема аппаратной части комплекса

Программная часть комплекса

Программная часть комплекса реализована в виде кроссплатформенного приложения оператора и набора Flutter-плагинов [3] с нативными реализациями для Android и Windows. Такой подход обусловлен потоковым характером обрабатываемых данных и необходимостью стабильного обмена по протоколу CRSF. Выполнение операций захвата кадров, обработки видеоданных и последовательного обмена с ELRS-передатчиком на стороне платформенных модулей позволяет снизить накладные расходы межъязыкового

взаимодействия и использовать оптимизированные средства целевых операционных систем.

Работа с видеопотоком реализована отдельными модулями по платформам, что связано с различиями системных API для камер и USB-устройств. Для обмена кадрами между нативными модулями разработана внутрипроцессная шина кадров, обеспечивающая публикацию кадров источниками видеоданных и доступ к ним независимых потребителей через общий контракт. Это позволяет не передавать поток изображений через платформенные каналы Flutter и снижает накладные расходы при обработке видеоданных внутри программного комплекса.

Для обработки видеоданных разработан модуль детекции объектов с единым Flutter-интерфейсом и платформенными реализациями инференса. Выбор моделей выполнялся с учетом ограничений целевых платформ и требуемого соотношения производительности и качества детекции: на Android применяется EfficientDet-Lite1 [4], на Windows - модель Yolo26s [5]. Обмен управляющими воздействиями и телеметрией реализован в нативном CRSF-плагине, формирующем пакеты RC-каналов, принимающем телеметрические кадры и обеспечивающем работу с ELRS-передатчиком на поддерживаемых целевых платформах.

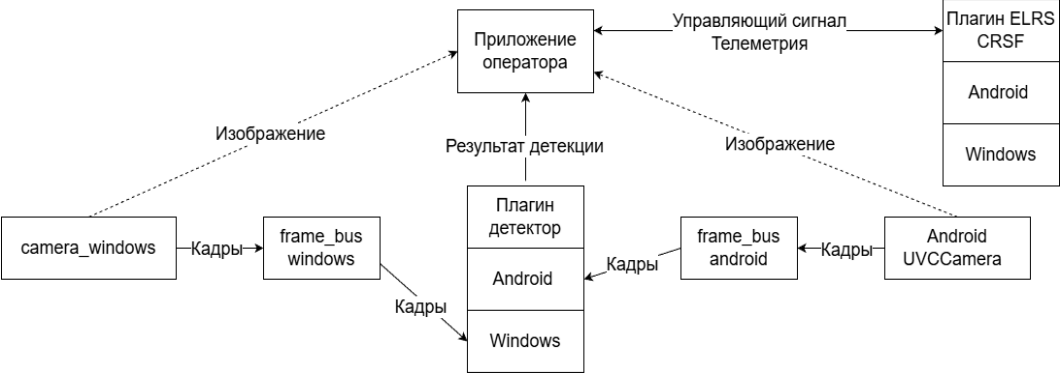


Рис2. Архитектура программных модулей комплекса.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная проверка выполнялась для трех основных подсистем комплекса: приема видеопотока, обработки кадров и обмена по протоколу CRSF. UVC-видеоприемник передавал видеопоток с разрешением 640×480 пикселей и частотой 30 кадров/с.

Таблица 1

Характеристики основных подсистем

Подсистема	Условия	Значение
Отображение видеопотока	Измеренная задержка	100 мс
Детекция объектов	Android, Google Pixel 6 Pro, EfficientDet-Lite1 int8, CPU 4 потока	63 мс
Детекция объектов	Windows, Ryzen 7 5800H, Yolo26s, CPU 6 потоков	90 мс
Передача управляющих пакетов	CRSF-плагин	стабильно до 100 Гц
Прием телеметрии	CRSF-плагин	стабильно до 100 Гц

Интеграция модулей проверена в сценарии следования наземной РТС за объектом как часть согласованного наземного контура: приложение использует детекцию в видеопотоке и телеметрию ориентации РТС для формирования управляющих воздействий. Реализация

демонстрирует расширение прикладных возможностей РТС за счёт совместного приёма видео, обработки данных на терминале оператора и обмена по CRSF в одном цикле.

Перспективы развития

Перспективы включают интеграцию MAVLink encapsulation поверх ELRS — обмен сообщениями MAVLink по существующему радиоканалу наряду с RC и телеметрией CRSF, включая расширенную телеметрию, команды управления и данные о параметрах и режимах РТС. Нативные плагины и шина кадров позволяют наращивать семейство модулей, источники видеоданных, алгоритмы обработки и потребителей кадров без перестройки базовой схемы взаимодействия; новые платформенные реализации плагинов переносят комплекс на иные устройства оператора при сохранении общего прикладного интерфейса.

Вывод

В работе получен программно-аппаратный комплекс оператора РТС, сочетающий на устройстве оператора приём и обработку видеоданных, передачу управляющих воздействий и обмен телеметрией с объектом управления в составе согласованного наземного контура. Предложенная архитектура ориентирована на потоковую обработку информации и снижение накладных расходов за счёт нативных модулей согласованного взаимодействия компонентов. Экспериментальные оценки и интеграционная проверка подтверждают возможность использования комплекса в контуре наблюдения и управления при непрерывном потоке данных в рассмотренных условиях.

Список литературы

1. Team BlackSheep. CRSF protocol specification [Электронный ресурс] // Репозиторий tbs-fpv/tbs-crsf-spec. URL: <https://github.com/tbs-fpv/tbs-crsf-spec/blob/main/crsf.md> (дата обращения: 02.05.2026)
2. ExpressLRS Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.expresslrs.org/> (дата обращения: 02.05.2026).
3. Flutter Documentation. Platform channels [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.flutter.dev/platform-integration/platform-channels> (дата обращения: 02.05.2026)
4. TensorFlow. TensorFlow Lite: Object detection [Электронный ресурс]. URL: https://www.tensorflow.org/lite/examples/object_detection (дата обращения: 02.05.2026).
5. Ultralytics Documentation. YOLO models [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата обращения: 02.05.2026)

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ВТ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ 3-Д КАРТЫ ПОМЕЩЕНИЯ

ТИХОНОВ Е.В.

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

Аннотация. В работе представлен метод построения трехмерной карты помещения с использованием RGB-D камеры и методов визуально-инерциального SLAM. Предложенный подход основан на поэтапной реконструкции сцены с формированием локальных облаков точек и их последующим объединением. Использование разбиения на участки позволяет снизить влияние накопления ошибки и уменьшить дрейф. Итоговая модель формируется на основе объединенного облака точек с применением методов реконструкции поверхности. Полученные результаты подтверждают эффективность метода при построении трехмерных моделей помещений.

Ключевые слова: 3D-карта, SLAM, RGB-D камера, RTAB-Map, облако точек, ICP, реконструкция поверхности

Введение

Задача построения трехмерных карт помещений в режиме реального времени является актуальной в области робототехники, навигации и систем технического зрения. Решение данной задачи позволяет обеспечивать автономное перемещение мобильных систем и формирование цифровых моделей окружающей среды.

Цель

Целью работы является разработка метода построения трехмерной карты помещения с использованием RGB-D камеры и программного пакета RTAB-Map [1]. Метод должен обеспечивать обработку потоков RGB, Depth и IMU в режиме, приближенном к реальному времени. Особое внимание уделяется повышению точности реконструкции и устойчивости оценки положения камеры. Результатом является формирование согласованной трехмерной модели помещения.

Аппаратная часть системы

Аппаратная часть системы предназначена для получения и передачи сенсорных данных, используемых при построении трехмерной карты помещения. В качестве основного сенсора применяется RGB-D камера Intel RealSense D435i, обеспечивающая получение потоков цветового изображения, карты глубины и инерциальных измерений.

Камера подключается к вычислительному устройству через интерфейс USB 3.0, что обеспечивает передачу данных в режиме реального времени. Встроенный IMU-модуль используется для получения информации об ориентации и ускорении камеры.

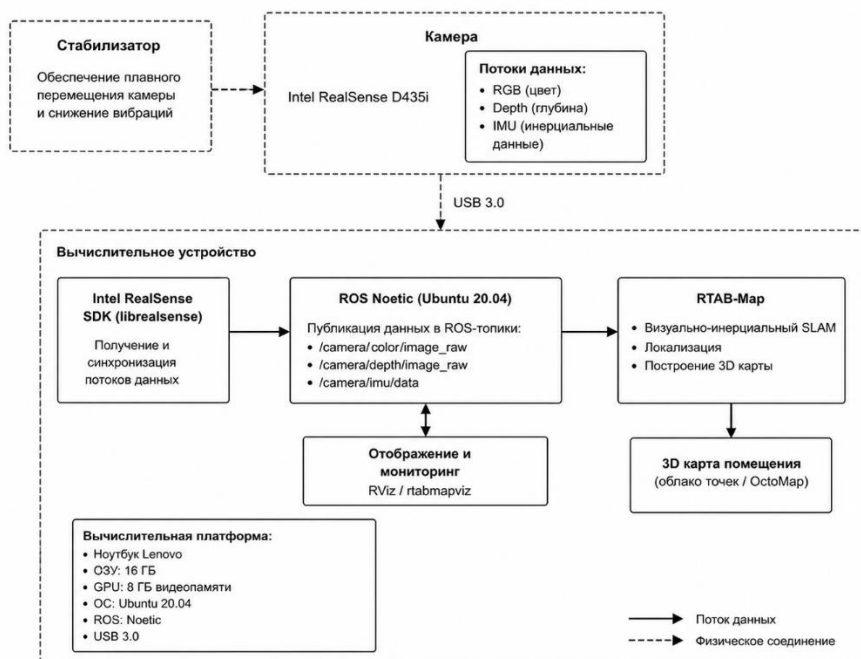


Рис. 1. Схема аппаратной части системы

В качестве вычислительной платформы используется ноутбук Lenovo с 16 ГБ оперативной памяти и 8 ГБ видеопамати под управлением операционной системы Ubuntu 20.04. Обработка и синхронизация данных выполняется в среде ROS Noetic с использованием пакета RTAB-Map.

Для уменьшения влияния резких движений и вибраций при съемке применяется стабилизатор, обеспечивающий более плавное перемещение камеры в процессе построения карты.

Программная часть метода

Программная часть метода реализована в среде Ubuntu 20.04 с использованием ROS Noetic, Intel RealSense SDK [2] и пакета RTAB-Map. Получение данных с камеры выполнялось в виде синхронизированных потоков RGB, Depth и IMU с разрешением 640×480 пикселей и частотой 30 кадров/с. Для повышения производительности обработки применялось GPU-ускорение с использованием CUDA.

На этапе предварительной обработки выполнялась фильтрация шумов глубины, устранение выбросов и выравнивание карты глубины относительно RGB-изображения. Это обеспечивало более точное формирование облака точек и повышало качество последующей реконструкции.

Особенностью метода является поэтапное построение карты с разбиением пространства на локальные участки. Для каждого участка выполнялось построение отдельного облака точек с использованием визуально-инерциальной одометрии. Такой подход позволил снизить влияние накопления ошибки и уменьшить дрейф, возникающий при длительном непрерывном сканировании.

Для повышения согласованности локальных карт применялись механизмы замыкания петель, реализованные в RTAB-Map. Полученные фрагменты сохранялись в виде отдельных облаков точек для последующей обработки.

Глобальная реконструкция выполнялась путем объединения локальных облаков точек. Для совмещения фрагментов использовался алгоритм Iterative Closest Point, обеспечивающий точное выравнивание облаков на основе минимизации расстояния между соответствующими точками. Комбинация ICP и loop closure позволила повысить точность стыковки и уменьшить накопленные ошибки.

После объединения выполнялась фильтрация и уплотнение итогового облака точек, включая уменьшение плотности (downsampling) и удаление шумовых точек. Это обеспечивало повышение устойчивости дальнейшей обработки и улучшение качества модели.

На заключительном этапе выполнялась реконструкция поверхности по объединенному облаку точек с использованием библиотеки Open3D [3]. Перед построением меша осуществлялась оценка нормалей и дополнительная фильтрация данных. Для генерации трехмерной модели применялся метод Пуассона [4], позволяющий получить непрерывную поверхность. Дополнительная постобработка включала удаление артефактов и сглаживание, что обеспечило высокое качество итоговой 3D-модели помещения.

Результаты

Разработанный метод обеспечивает построение трехмерной карты помещения на основе данных RGB-D камеры с использованием визуально-инерциального SLAM. В процессе работы формируются локальные облака точек, которые затем объединяются в единую модель помещения.

Применение поэтапного сканирования позволило снизить влияние накопления ошибки и уменьшить дрейф, возникающий при непрерывной съемке. Объединение фрагментов выполняется корректно, без существенных разрывов и искажений геометрии.

Итоговое облако точек характеризуется достаточной плотностью и позволяет выделять основные элементы помещения, такие как стены, пол и крупные объекты. Построение поверхностной модели обеспечивает получение непрерывной трехмерной геометрии.

Полученная модель визуально соответствует реальной структуре помещения.

Вывод

В работе разработан метод построения трехмерной карты помещения на основе данных RGB-D камеры с использованием визуально-инерциального SLAM. Особенностью подхода является поэтапная реконструкция сцены с последующим объединением локальных фрагментов, что позволяет снизить влияние накопления ошибки.

Предложенное решение ориентировано на использование доступных аппаратных средств, таких как RGB-D камеры и стандартные вычислительные устройства, без необходимости применения дорогостоящих специализированных систем.

Дальнейшее развитие работы может быть направлено на автоматизацию процесса сканирования и построения карты, а также на реализацию системы в составе мобильной робототехнической платформы на базе Raspberry Pi с возможностью полностью автономной работы.

Список литературы

1. RTAB-Map Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://introlab.github.io/rtabmap/> (дата обращения: 29.04.2026).
2. Intel RealSense SDK 2.0 (librealsense) [Электронный ресурс] // GitHub-репозиторий. URL: <https://github.com/IntelRealSense/librealsense> (дата обращения: 01.05.2026).
3. Open3D Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.open3d.org/docs/> (дата обращения: 01.05.2026).
4. Kazhdan M., Hoppe H. Poisson Surface Reconstruction [Электронный ресурс]. URL: <https://hhoppe.com/proj/poissonrecon/> (дата обращения: 01.05.2026).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЁТА И ХРАНЕНИЯ УЧЕБНЫХ РАБОТ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ

Павловский Н.А., Сайдулина Е.Д.

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

Аннотация. В работе представлены проектирование и разработка информационной системы для электронного учёта и хранения учебных работ студентов кафедры. Система позволяет автоматизировать контроль выполнения рабочих программ дисциплин преподавателями, учитывать сдачу отчётов студентами и минимизировать бумажный документооборот. Применение системы повышает эффективность администрирования и прозрачность учебного процесса.

Ключевые слова: Информационная система, электронный учёт, учебные работы, рабочие программы дисциплин, автоматизация

Введение

Современные образовательные учреждения активно внедряют цифровые технологии, так как это позволяет повысить эффективность организации образовательного процесса и облегчает контроль учебной деятельности. При этом на кафедрах существует значительный объём работы, связанный с ведением документации, отчётностью и соблюдением нормативных требований. Несмотря на наличие различных систем, которые помогают с решением большого количества образовательных задач, зачастую процессы учёта и хранения учебных работ студентов остаются частично ручными, что приводит к задержкам, ошибкам и значительным трудозатратам, а также создаёт потребность в автоматизации части этих процессов.

Анализ предметной области



Рис. 1. Форматы приёма учебных работ студентов

Исследование форматов приёма отчётов показало, что на практике чаще всего используется электронная почта (50 %), а также образовательные платформы и системы управления обучением, такие как Moodle [1] или Google Classroom (25 %). При этом часть респондентов продолжает использовать бумажные носители (8,3 %) или облачные хранилища (16,7 %). Это указывает на фрагментированность используемых инструментов и отсутствие единого стандарта.

Среди основных сложностей при приёме и проверке учебных работ респонденты выделили ошибки в оформлении отчётов, отсутствие аналитики и статистики, несоответствие работ установленным требованиям ГОСТ [2] и шаблонам, а также проблемы, связанные с хранением и поиском файлов. Эти проблемы напрямую указывают на необходимость автоматической проверки оформления, удобной навигации, централизованного хранения данных и инструментов аналитики.

Таким образом, результаты пользовательского исследования подтвердили актуальность разработки единого цифрового приложения для учёта учебных работ. Автоматизация этих процессов позволит обеспечить соблюдение сроков хранения работ, аналитическую поддержку и контроль руководства, повысить удобство работы и снизить нагрузку на преподавателей и других сотрудников кафедры.

Сравнительный анализ существующих решений показал, что универсальной системы, закрывающей задачи кафедрального учёта учебных работ, на рынке не представлено: Moodle и Google Classroom ориентированы на дистанционное обучение в рамках курса и не обеспечивают структурированного архива и автоматической проверки оформления, а 1С:Университет решает задачи административного учёта, но не работает со студенческими работами как с самостоятельной сущностью. Сводные результаты сравнения четырёх систем по шести ключевым критериям приведены в таблице 1 и визуализированы в виде радарной диаграммы на рисунке 2.

Таблица 1

Сравнение функциональных возможностей систем для учёта учебных работ

Возможность	Moodle	Google Classroom	1С:Университет	ИС «Отчёты»
Структурированное хранение работ	—	—	±	+
Проверка оформления работ	плагин	—	—	+
Аналитика по учебным работам	±	—	—	+
Работа с учебными планами	±	—	+	±
Оценка и учёт результатов	+	+	+	+

Возможность	Moodle	Google Classroom	1С:Университет	ИС «Отчёты»
Обратная связь преподавателя	+	+	±	+

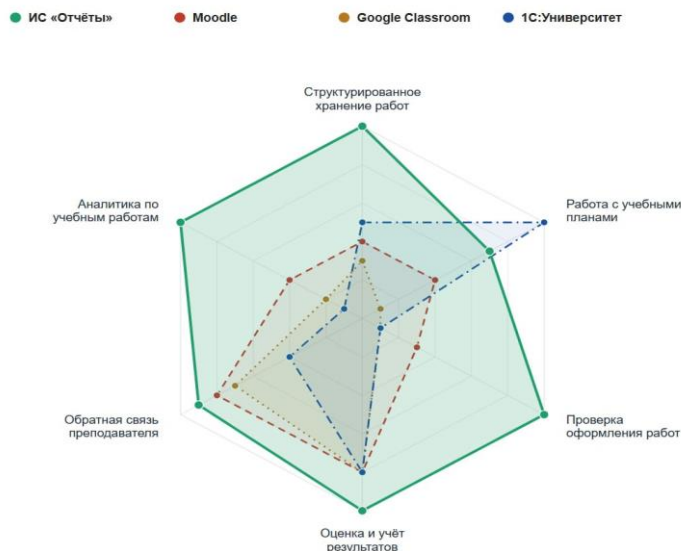


Рис. 2. Сравнительный анализ функциональных возможностей систем

Из диаграммы видно, что разрабатываемая информационная система превосходит рассмотренные решения по пяти из шести критериев, уступая лишь 1С:Университет в части работы с учебными планами, что объясняется административной специализацией последней.

4.6 Индивидуальное домашнее задание

Тема: Анализ и исследование реальной системы массового обслуживания

Цель работы: использование аппарата систем массового обслуживания при проведении исследования реальной системы. Оцениваются особенности реальной системы и ее модели. Для исследования используется комплекс самостоятельно полученных исходных данных и построенной по ним модели.

Описание работы

Работа выполняется индивидуально или бригадой из 2-х человек "в полевых условиях" (т.е. на самом объекте, дома, в библиотеке (в других условиях)).

Объект выбирается бригадой самостоятельно.

Объект изучается и анализируется, после чего в качестве модели выбирается система массового обслуживания, которая наиболее адекватно описывает функционирование объекта. Проводится сбор исходных данных, в результате которого определяют характеристики потока заявок и интенсивности обслуживания, числа обслуживающих аппаратов и емкость очереди, дисциплина обслуживания, ресурсные затраты и возможную прибыль от функционирования СМО. Рассчитываются все необходимые характеристики исследуемой СМО, в том числе ресурсные. Анализируются возможности улучшения функционирования реального объекта на основе работы в модели.

Рис. 3. Пример свободного текстового описания в разделе 4.6 РПД

Сложность автоматизации в части учебных работ студентов заключается в большом количестве нормативных документов и правил. В частности, информация о сдаче необходимой отчётности по некоторым видам работ в рабочей программе дисциплины (РПД) представлена повествовательно, что затрудняет её перевод на структурированный формат для информационной системы. В качестве примера в работе рассмотрена РПД «Специальные главы математики», предназначенная для подготовки магистров по

направлению 09.04.02 «Информационные системы и технологии» по программе «Информационные системы и технологии в управлении цифровым предприятием». Так, в разделе 4.6 «Индивидуальное домашнее задание» рассматриваемой РПД сведения о теме, цели работы и критериях оценки приводятся в виде текстового описания (Рис. 3), что не позволяет использовать их напрямую для формирования таблиц и отчётов в информационной системе.

Было принято решение использовать данные из базы РПД, в частности таблицу 6.3 «График текущего контроля успеваемости» (Рис. 4), поскольку в ней указаны темы и виды контроля, обязательные для получения зачёта по дисциплине. Данная таблица имеет строгую структуру (учебная неделя, тема занятия, вид контроля) и пригодна для автоматического импорта

6.3 График текущего контроля успеваемости

Неделя	Темы занятий	Вид контроля
1	Системы массового обслуживания	
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		Доклад / Презентация
9	Описание, оценка и оптимизация функционирования сложных систем и технологий Случайные потоки	
10		
11		
12		
13		
14		ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ

Рис. 4. Структурированная таблица 6.3 РПД, используемая для автоматического импорта

Таким образом, анализ РПД подтвердил необходимость использовать структурированные источники данных и дополнительно учитывать сведения, представленные в текстовых разделах программы.

✓ п. 6.3 РПД — График текущего контроля В БД через Metabase Структурированные данные Неделя 8: Системы массового обслуживания — Доклад / Презентация Неделя 14: Случайные потоки — ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ Формат: таблица в БД (control_schedule) Объём: 1 строка на тему Импорт: автоматический через Metabase	✗ п. 4.6 РПД — Индивидуальное задание Отсутствует в БД Свободный текст в PDF Тема: «Анализ и исследование реальной системы массового обслуживания». Цель: использование аппарата СМО при исследовании реальной системы. Критерии оценки — 9 пунктов. Минимум 10 страниц, 7 источников. Формат: произвольный текст (1–2 страницы) Содержит: цели, критерии, требования к оформлению Импорт: ручной ввод преподавателем
--	--

Рис. 5. Сравнение форматов представления данных в РПД

Проектирование

На основании полученных данных была спроектирована информационная система электронного учёта и хранения учебных работ студентов. Система реализована как веб-приложение с модульной архитектурой и позволяет:

- вести учёт сдачи учебных работ студентами;

- контролировать выполнение РПД преподавателями;
- хранить и управлять учебными работами;
- формировать статистику для руководства кафедры.

Система предусматривает разграничение прав для преподавателя, администратора и заведующего кафедрой. Заведующий получает доступ к сводной аналитике, а при совмещении ролей пользователю доступны функции преподавателя.

Базовый функционал включает личный кабинет преподавателя с доступом к своим дисциплинам, архив учебных работ с фильтрацией по учебным годам, семестрам и дисциплинам, журнал действий пользователей. Аналитика реализована на двух уровнях: личная – показатели по своим дисциплинам у преподавателя, и кафедральная — сводка по всем преподавателям, дисциплинам, группам и семестрам у заведующего, с экспортом графиков и таблиц в PDF и Excel.

Система предусматривает автоматическую проверку загружаемых работ по настраиваемому шаблону. Для каждой дисциплины и вида контроля задаются критерии оформления, включая параметры шрифта и страниц, количество источников, оформление рисунков и таблиц, структуру документа, поля, межстрочный интервал и абзацный отступ. После загрузки система сверяет документ с шаблоном, рассчитывает процент соответствия и формирует отчёт с найденными несоответствиями.

Административный интерфейс позволяет назначенному заведующим администратору помогать преподавателям в загрузке учебных работ и контролировать их сохранность. Система учитывает возможность переназначения преподавателей с учётом актуального расписания занятий и позволяет указать ссылку курса на платформе Moodle для учёта работ в статистике. Подключение по API к базе данных ИС ИОТ обеспечивает получение информации, указанной в рабочей программе дисциплины, что упрощает соблюдение нормативных требований.

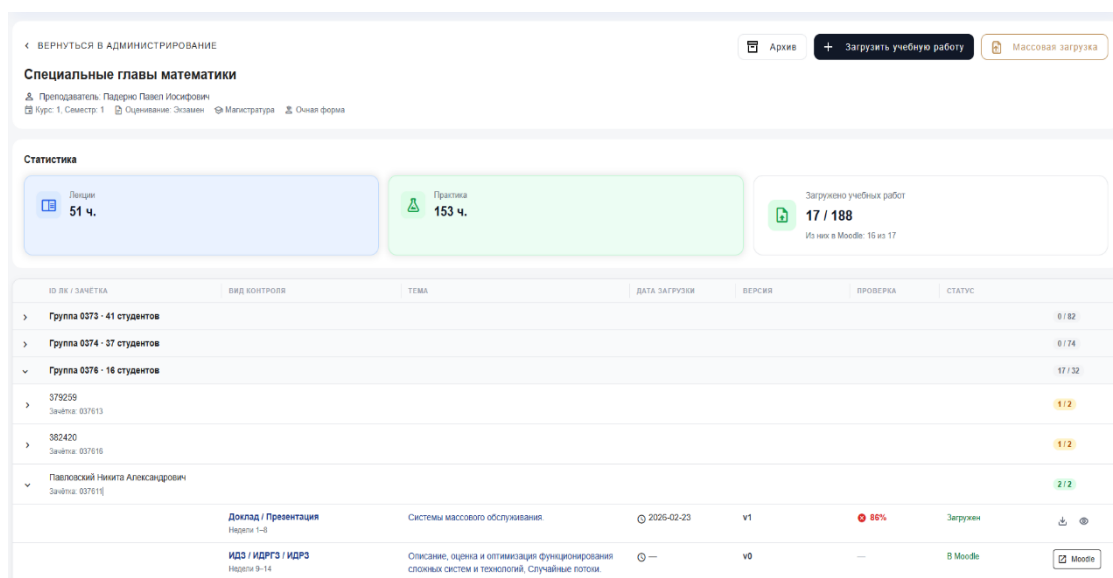


Рис. 6. Пользовательский интерфейс «Страница дисциплины»

На рисунке 6 представлена страница дисциплины на примере курса «Специальные главы математики». Интерфейс содержит метаданные дисциплины, панель действий, блок статистики и иерархическую таблицу «группа → студент → виды контроля». В таблице отображаются индикаторы прогресса, дата загрузки, версия работы, процент соответствия

шаблону и итоговый статус. Такая структура даёт преподавателю единое представление о состоянии сдачи работ и быстрый доступ к загрузке, архиву и проверке.

Разработка системы проходила в несколько этапов. На начальном этапе было выполнено подключение к базе данных РПД через API, что обеспечило получение актуальной информации о видах отчётности и их учёт в статистике. Далее была спроектирована структура базы данных и определена логика взаимодействия модулей. Затем разработаны веб-интерфейсы для преподавателей и администраторов с возможностями загрузки, проверки и фильтрации учебных работ, а также формирования аналитических отчётов. На заключительном этапе реализована автоматическая проверка работ по настраиваемым шаблонам, позволяющая контролировать соответствие установленным требованиям и формировать корректную статистику.

После внедрения «ИС Отчёты» преподаватели смогут работать без бумажных отчётов и хранения файлов по электронной почте, а администраторы смогут помогать преподавателям и отслеживать количество сданных учебных работ в соответствии с РПД.

Практическая значимость и перспективы

Перспективы развития связаны с улучшением интерфейсов, расширением интеграции с Moodle, подключением ETU ID и входом студентов для последующей проверки работ в системе, а также с объединением с другими университетскими системами через API.

Список литературы

1. Moodle Documentation. URL: <https://docs.moodle.org> (дата обращения: 04.25.2026)
2. ГОСТ 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Ссылки и библиографические описания.
3. Рабочая программа дисциплины «Специальные главы математики». URL: <https://etu.ru/sveden/files/rim/RPD24-524SpetsialnyeGlavyMatematiki-wLZnC.pdf> (дата обращения: 27.04.2026)

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ В АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ ИГРЕ 2-Х ЛИЦ НА ГРАФЕ

ИВАНОВ А.В., ЧУМАК В.В.

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

Аннотация. Исследуется задача нахождения оптимальных стратегий в антагонистической игре двух лиц на конечном ациклическом графе. Описан алгоритм вычисления глубины вершин на основе анализа матрицы смежности и уровней подмножеств. Предложен индуктивный метод построения оптимальных стратегий игроков; индукция ведется по подыграм, состоящим из позиций, глубина которых не превосходит фиксированного числа $k = 0, 1, 2, \dots$. Оптимальные стратегии игроков образуют седловую точку, исход в которой равен цене игры. Приведен пример решения игры с расчетом выигрышей в финальных позициях. Разработана программа на языке Python для автоматизированного анализа графовых игр. Результаты подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: теория игр, ациклический граф, оптимальные стратегии, седловая точка, матрица смежности.

Задание игры на графе

В работе рассматривается конечный ориентированный ациклический граф $G = \langle A, \gamma \rangle$, где A – множество вершин (позиций), $\gamma \subseteq A \times A$ – множество дуг. Через $\gamma\langle a \rangle$ обозначим множество последующих вершин для a . Множество финальных позиций A_{fin} состоит из вершин без исходящих дуг. Нефинальные позиции разбиты на непересекающиеся подмножества A_1 и A_2 (позиции игроков 1 и 2) [1].

Игра состоит в том, что игроки поочередно выбирают позиции игры по следующему правилу. Находясь в некоторой позиции a , игрок может выбрать любую последующую вершину графа γ , т.е. позицию $a' \in \gamma\langle a \rangle$. Игра начинается в начальной позиции $a_0 \in A_1$ (в которой ход делает игрок 1) и заканчивается тогда, когда один из игроков выберет некоторую финальную позицию $a_n \in A_{\text{fin}}$. В итоге получается последовательность позиций $(a_0, \dots, a_n)$, которая называется партией. Числовые функции выигрыша f_1 и f_2 определены на множестве всех финальных позиций A_{fin} . Цель каждого игрока состоит в получении возможно большего выигрыша. В антагонистической игре $f_2 = -f_1$, то есть выигрыш игрока 1 равен проигрышу игрока 2.

Пример игры на графе

Граф задан матрицей смежности (рис. 1). Анализ матрицы показывает: позиции a_{10} - a_{16} – финальные; a_0 – начальная (игрок 1); $\{a_1, a_2, a_4\}$ – позиции игрока 2; $\{a_3, a_5, a_6, a_8\}$ – игрока 1; $\{a_7, a_9\}$ – игрока 2. Также на рис. 1 приведена матрица игры с разметкой позиций (финальные, игроки 1 и 2).

Ацикличность графа подтверждается отсутствием циклов на геометрическом изображении (рис. 2) или алгоритмом поиска в глубину [2].

Глубина вершин графа

Для анализа игры вводится понятие глубины вершины конечного ациклического графа $\langle A, \gamma \rangle$. Глубиной вершины a называется натуральное число $d(a)$, равное максимальной длине пути, исходящего из a . Вершины с одинаковой глубиной k образуют уровневое подмножество.

	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16
a0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
a2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
a4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
a5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
a6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
a7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
a8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
a9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
a10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 1. Матрица смежности графа $\langle A, \gamma \rangle$ с разметкой позиций

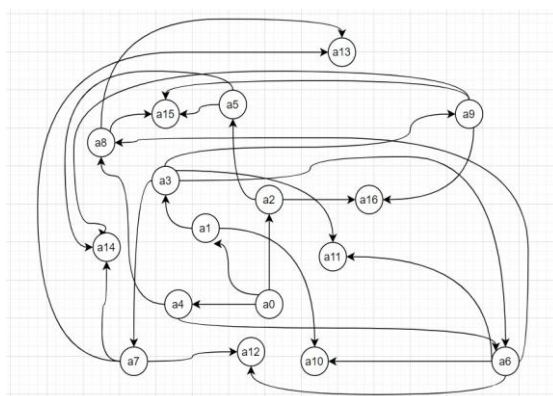


Рис. 2. Геометрическое изображение графа, построенное на основе Рис. 1

Математически глубина определяется через последовательность расширяющихся подмножеств $C_0 \subseteq C_1 \subseteq C_2 \subseteq \dots$:

1. $C_0 = \{a \in A: \gamma(a) = \emptyset\}$ (финальные вершины);
2. $C_{k+1} = C_k \cup \{a \in A: \gamma(a) \subseteq C_k\}$.

Справедливо утверждение: вершина $a \in C_k$ тогда и только тогда, когда длина любого пути из a не превосходит k . Следовательно, разность $C_k \setminus C_{k-1}$ состоит из вершин глубины k .

Для нахождения глубины применяется матричный алгоритм: граф задаётся матрицей смежности M . Индуктивно строится последовательность матриц $M_0, M_1, M_2, \dots$:

- Шаг 0: Находятся нулевые строки M (финальные вершины). Соответствующие столбцы M_0 помечаются, в добавочном столбце ставится 0.
- Шаг k : Находятся строки, где единицы стоят только в помеченных столбцах. Эти столбцы помечаются, в добавочном столбце записывается k .
- Процесс завершается, когда все столбцы помечены. Добавочный столбец содержит глубины вершин.

Для графа, изображённого на рис. 1, алгоритм нахождения глубин представлен в таблице 1, где каждый шаг добавляет новую строку с текущими значениями глубин.

Таблица 1

Процесс вычисления глубины вершин графа $\langle A, \gamma \rangle$ по шагам алгоритма

Шаг алгоритма a	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}
Шаг 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0
Шаг 1	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Шаг 2	-	-	-	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Шаг 3	-	3	3	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Шаг 4	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Итоговая глубина	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

После вычисления глубин граф дополняется целевой структурой — функцией выигрыша f на финальных позициях (табл. 2).

Таблица 2

Оценка финальных позиций игры

Финальные позиции	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16
Оценка	3	2	5	4	7	1	3

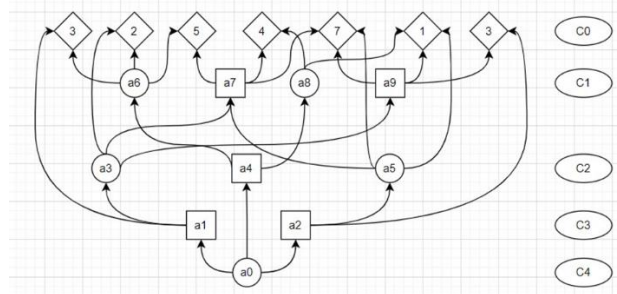


Рис. 3. Итоговое геометрическое изображение игры на графе $\langle A, \gamma \rangle$ с указанием глубин и оценок (На рисунке позиции игрока 1 обозначены кружком, игрока 2 — квадратом, финальные вершины — ромбом. В овалах указана глубина, рядом с финальными вершинами — оценка выигрыша)

Переход к нормальной форме в игре на графе

Стратегией игрока i называется функция σ_i , выбирающая следующую позицию из доступных: $\sigma_i(a) \in \gamma(a)$. Ситуация (σ_1, σ_2) однозначно определяет партию игры и её исход. Нормальная форма игры задается тройкой $G = \langle \Sigma_1, \Sigma_2, f \rangle$, где Σ_i - множества стратегий игрока $i = 1, 2$, f - функция выигрыша игрока 1.

Число стратегий растет экспоненциально в зависимости числа ходов в позициях: $R(i) = \prod_{a \in A_i} |\gamma(a)|$. Для графа, изображенного на рис. 1, количество стратегий составляет $R(1) = 162, R(2) = 72$. Прямое построение матрицы игры затруднительно, поэтому используется алгоритмический подход на основе структуры графа.

Оптимальные стратегии и седловые точки

Справедлива теорема: в антагонистической игре на конечном ациклическом графе существуют оптимальные стратегии игроков 1 и 2, образующие седловую точку [1].

Ситуация (σ_1, σ_2) называется седловой точкой, если для любых стратегий σ_1, σ_2 выполняется неравенство: $f(\sigma_1, \sigma_2) \leq f(\sigma_1, \sigma_2) \leq f(\sigma_1, \sigma_2)$. Значение $v = f(\sigma_1, \sigma_2)$ называется ценой игры. Оптимальные стратегии гарантируют игроку 1 выигрыш не менее v , а игроку 2 - проигрыш не более v .

Построение оптимальных стратегий ведется индуктивно по глубине вершин $d(a)$ на стабильных подмножествах $C_k (k = 0, 1, 2, \dots)$, каждое из которых является подыгрой исходной игры.

1. *База индукции (глубина 1):* Для позиций $a \in C_1 \setminus C_0$ все последующие вершины финальны. Игрок 1 выбирает вершину a' с $\max f(a')$, Игрок 2 — с $\min f(a')$.
2. *Шаг индукции (глубина $k+1$):* Для позиций $a \in C_{k+1} \setminus C_k$ последующие вершины имеют глубину $\leq k$, где стратегии уже построены. Игрок 1 выбирает вершину, максимизирующую выигрыш в соответствующей подыгре, Игрок 2 - минимизирующую проигрыш.

Приведен пример выполнения представленного алгоритма для графа из п. 1 (максимальная глубина 4):

- На позициях глубины 1 (a_6, a_7, a_8, a_9) выбираются ходы в финальные вершины с экстремальными оценками.

- На последующих шагах ходы определяются на основе значений подыгр.
- *Итог:* Оптимальная партия $a0 \rightarrow a4 \rightarrow a8 \rightarrow a13$. Цена игры $v = 4$. Оптимальные ходы представлены на рис. 4.

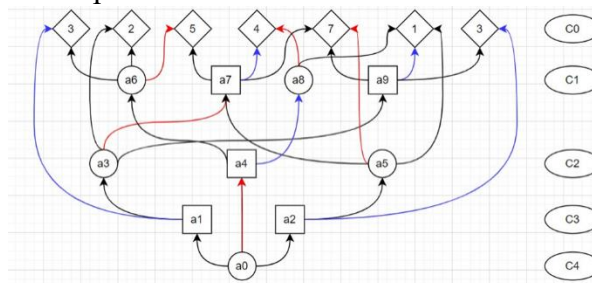


Рис. 4. Оптимальные стратегии игроков (цена игры 4) (На графе выделены дуги, соответствующие оптимальным ходам: $a0 \rightarrow a4$, $a4 \rightarrow a8$, $a8 \rightarrow a13$)

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет находить оптимальные стратегии и цену игры без полного перебора всех ситуаций, используя индукцию по глубине вершин графа. Построенные стратегии образуют седловую точку: одностороннее отклонение от седловой точки уменьшает выигрыш (или увеличивает проигрыш) отклонившегося игрока. Результаты работы подтверждены программной реализацией на языке Python, автоматизирующей анализ матрицы смежности и вычисление глубин вершин.

Список литературы

1. Поздняков С. Н., Рыбин С. В. Дискретная математика: учебное пособие. Версия от 26.07.2020. Раздел «Графы и бинарные отношения». С. 229–357.
2. Algorithmica : открытый учебник по алгоритмам и структурам данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/algorithmica-org/ru.git> (дата обращения: 13.04.2026).

ТИПОЛОГИЯ СЕТЕЙ И РАВНОВЕСИЯ В СЕТЕВОЙ ИГРЕ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ЭКСТЕРНАЛИЯМИ ЗНАНИЙ

Комаров Д. А.

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

Аннотация. В работе рассматривается сетевая игра с производством и экстерналиями знаний, в которой агенты выбирают объём инвестиций в знания, а результат производства зависит от собственных инвестиций и от сетевой среды, формируемой соседями. Предложена типология сетевых структур, пригодная для анализа равновесных конфигураций. Показано, что структура сети влияет на существование внутреннего равновесия и на качественный тип поведения агентов.

Ключевые слова: сетевая игра, экстерналии знаний, производство, равновесие Нэша, типология сетей, инвестиции в знания, граф, матрица смежности.

Введение

Современные инновационные и образовательные системы всё чаще имеют сетевую природу: фирмы, университеты, научные лаборатории, цифровые платформы и исследовательские коллективы связаны каналами обмена знаниями, технологиями и информацией. В таких системах результат деятельности отдельного участника зависит не только от его собственных решений, но и от действий связанных с ним агентов. Поэтому

для анализа инвестиционного поведения в сфере создания знаний недостаточно рассматривать агентов как изолированных субъектов; необходимо учитывать структуру взаимодействий между ними.

Актуальность исследования определяется тем, что знания обладают свойством положительного внешнего эффекта. Инвестиции одного агента могут увеличивать производственные возможности других агентов, однако величина такого эффекта зависит от положения агента в сети. Следовательно, одна и та же совокупность участников при разных конфигурациях связей способна приводить к различным равновесным исходам. **Цель исследования** состоит в построении типологии сетей и анализе равновесий в сетевой игре с производством и экстерналиями знаний.

Модель и методика исследования

Рассматривается сеть $G = (N, E)$, где $N = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество агентов, а E — множество связей между ними. Структура сети задаётся матрицей смежности M . В первом периоде агент i получает начальный запас блага e и распределяет его между текущим потреблением c_i^1 и инвестициями в знания k_i : $c_i^1 + k_i = e$, $0 \leq k_i \leq e$. Во втором периоде результат производства зависит от собственных инвестиций агента и от среды, создаваемой его соседями.

Среда агента определяется как сумма его собственных инвестиций и инвестиций соседей: $K_i = k_i + \sum_{j \in N(i)} k_j$. Производственная функция имеет вид $F_i(k_i, K_i) = B_i k_i K_i$, где $B_i > 0$. Косвенная функция полезности агента записывается как $V_i(k_i, K_i) = (e - k_i)(e - a(e - k_i)) + A_i k_i K_i$, где $A_i = b_i B_i$ — параметр продуктивности агента.

В качестве концепции решения используется равновесие Нэша с экстерналиями. Его особенность состоит в том, что при выборе инвестиций агент рассматривает свою среду как заданную, хотя фактически сам участвует в её формировании. Для внутреннего равновесия условие первого порядка имеет вид $e(2a - 1) - 2ak_i + A_i K_i = 0$. В матричной форме система условий внутреннего равновесия записывается следующим образом: $(D_A - 2aI)k + D_{AM}k = e(1 - 2a)1$, где D_A — диагональная матрица продуктивностей, I — единичная матрица, 1 — единичный вектор.

Методика исследования включает построение типологии сетей, аналитическое описание условий равновесия и вычислительный перебор равновесных конфигураций. В равновесии выделяются три типа поведения агентов: пассивный агент выбирает $k_i = 0$, активный агент выбирает $0 < k_i < e$, а гиперактивный агент выбирает $k_i = e$. Такая классификация позволяет интерпретировать равновесие не только количественно, но и качественно.

Типология сетей

Для анализа равновесий выделяются несколько классов сетевых структур. Полная сеть описывает ситуацию максимально плотного обмена знаниями, когда каждый агент связан со всеми остальными. Диада является минимальной полной сетью и позволяет явно проанализировать взаимодействие двух агентов. Регулярные сети характеризуются одинаковой степенью всех вершин и удобны для исследования симметричных равновесий. Звёздные сети отражают централизованное распространение знаний, при котором центральный агент связан со всеми периферийными, а периферийные агенты не связаны между собой. Цепи и циклы описывают локальное распространение знаний по последовательным или замкнутым каналам взаимодействия.

Отдельное значение имеют сети с типами вершин. Вершины относятся к одному типу, если они имеют одинаковое число соседей каждого другого типа. Это позволяет свести анализ больших графов к системе меньшей размерности и исследовать равновесные инвестиции не для каждой вершины отдельно, а для структурно эквивалентных групп агентов.

Результаты вычислительного анализа

Для иллюстрации влияния сетевой структуры был проведён вычислительный анализ равновесий для нескольких сетей из пяти вершин: полной сети K5, цикла C5, звезды S5 и цепи P5. При выбранных параметрах для полной сети и цикла были найдены допустимые симметричные внутренние равновесия. В полной сети равновесные инвестиции составляют $k_i = 0,444$ для всех агентов, а среда каждого агента равна $K_i = 2,222$. Для цикла C5 равновесные инвестиции выше и составляют $k_i = 0,923$ для всех агентов.

Полученный результат показывает, что увеличение связанности сети не обязательно приводит к росту индивидуальных инвестиций. В полной сети каждый агент получает больше внешних эффектов от соседей, поэтому его собственный стимул к инвестированию может снижаться. В цикле внешняя среда формируется только двумя соседями, поэтому агент компенсирует меньший объём сетевых экстерналий большим собственным вкладом.

Для звезды и цепи кандидат на внутреннее равновесие выходит за допустимый интервал, что указывает на невозможность внутренней конфигурации при выбранных параметрах. Последующий перебор угловых конфигураций показал, что для звезды и цепи сохраняется только полностью пассивное равновесие. Для полной сети были найдены три равновесные конфигурации: полностью пассивная, внутренняя симметричная и полностью гиперактивная. Для цикла найдено тринадцать равновесий, включая смешанные активные и гиперактивные конфигурации. Это связано с локальной структурой цикла: изменение поведения одной вершины влияет только на её соседей, поэтому возможны более разнообразные локальные сочетания типов поведения.

Заключение

Проведённое исследование показывает, что структура сети является самостоятельным фактором равновесного поведения агентов в игре с производством и экстерналиями знаний. Равновесные инвестиции определяются не только параметрами продуктивности, но и положением агента в графе, количеством соседей и типом сетевой структуры. Предложенная типология позволяет систематизировать классы сетей и заранее выделять структуры, для которых возможны симметричные внутренние равновесия или, напротив, требуется анализ угловых конфигураций.

Практическая значимость результатов состоит в возможности применять сетевую модель для анализа инновационных кластеров, научно-образовательных сетей, университетско-промышленных консорциумов и цифровых платформ. Подобные структуры наблюдаются, например, в полупроводниковой отрасли вокруг TSMC, ASML и fabless-компаний, в биофармацевтических кластерах с участием крупных фармацевтических корпораций, университетских лабораторий и biotech-стартапов, а также в цифровых экосистемах App Store, Google Play и других платформ. В таких системах инвестиции одного участника в знания могут повышать производственные возможности связанных с ним агентов. Поэтому изменение структуры связей — подключение нового технологического партнёра, формирование консорциума, усиление центральной

платформы или появление нового канала обмена знаниями — способно менять стимулы к инвестициям и итоговое распределение производственных результатов.

Список литературы

1. Galeotti A., Goyal S., Jackson M. O., Vega-Redondo F., Yariv L. Network Games // Review of Economic Studies. 2010. Vol. 77, No. 1. P. 218–244.
2. Garmash M., Utkina A., Korolev A. Networks Structure, Equilibria, and Adjustment Dynamics in Network Games with Nonhomogeneous Players // Contributions to Game Theory and Management. 2018. Vol. XII. P. 128–139.
3. Jackson M. O. Social and Economic Networks. Princeton: Princeton University Press, 2008.
4. Matveenko V. D., Korolev A. V. Network Game with Production and Knowledge Externalities // Contributions to Game Theory and Management. 2015. Vol. VIII. P. 199–222.
5. Romer P. M. Increasing Returns and Long-Run Growth // Journal of Political Economy. 1986. Vol. 94, No. 5. P. 1002–1037.
6. Киселёв А. О., Юрченко Н. И. Игровые равновесия и переходная динамика в диаде с гетерогенными агентами // Математическая теория игр и её приложения. 2018. Т. 10, вып. 1. С. 40–64.
7. Матюшкина М. В., Соболева К. В. Динамика приспособления в регулярной стохастической сети // Математическая теория игр и её приложения. 2020. Т. 12, вып. 3. С. 150–166.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПЛОСКИМ СПИРАЛЬНЫМ ИНДУКТОРОМ

БУРСКАЯ И.В.¹, КОЗУЛИНА Т.П.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Тезисы рассматривают процесс моделирования равномерного индукционного нагрева стальной пластины в плоском спиральном индукторе перед горячей штамповкой. С помощью программного пакета ANSYS была построена расчётная модель индукционной системы и исследованы связанные электромагнитные и тепловые процессы, возникающие при индукционном нагреве пластины. На основе полученных результатов подобраны оптимальные параметры индукционной системы для нагрева стальной пластины до температуры горячей штамповки 1250 °С.

Ключевые слова: индукционный нагрев, электромагнитное поле, горячая штамповка, численное моделирование, электромагнитный расчет, тепловой расчет

Перед горячей штамповкой заготовка должна соответствовать двум основным требованиям: она должна быть прогрета по всей толщине, а ее температура должна находиться в рабочем интервале 1150–1250 °С. Это связано с тем, что при штамповке деформируется весь объем металла, поэтому недостаточно нагреть только поверхностный слой.

При повышении температуры сталь становится более пластичной. Благодаря этому металл легче деформируется и лучше заполняет форму штампа. Если внутренние слои остаются недогретыми, заготовка деформируется неравномерно: поверхность может быть достаточно нагрета, а середина будет хуже поддаваться деформации. Перегрев также нежелателен, так как он может ухудшить структуру металла. Поэтому при подборе режима важно обеспечить прогрев по всей толщине и удерживать температуру в заданном диапазоне.

Объектом исследования является стальная пластина толщиной 5 мм. Она нагревается в магнитном поле плоского спирального трехвиткового индуктора, расположенного над поверхностью пластины.

Особенностью применения плоского спирального индуктора является то, что нагрев пластины может быть неравномерным. Температура зависит от расположения витков, расстояния до заготовки, размеров пластины, краевых участков и свойств материала. В зоне, расположенной ближе к виткам, нагрев может быть более интенсивным, а участки между витками и у краев пластины могут прогреваться иначе.

По этой причине для оценки нагрева в работе используется моделирование в ANSYS. Численная модель позволяет учесть геометрию индуктора и пластины, воздушный зазор, число витков, размеры спирали, частоту тока, его величину и свойства материалов. По результатам моделирования можно определить распределение температуры в заготовке, выявить зоны возможного перегрева или недогрева, а также оценить, насколько выбранные параметры подходят для нагрева пластины перед горячей штамповкой.

Моделируемая геометрия индукционной системы включает три основные области: стальную пластину, медный индуктор и окружающее воздушное пространство. Воздушная область необходима для корректного расчёта распределения электромагнитного поля вокруг индуктора и заготовки. Внутренний диаметр индуктора составляет 20 мм, внешний диаметр трубки – 15 мм, толщина стенки трубки – 1 мм. Зазор между соседними витками индуктора принят равным 5 мм. Расстояние между индуктором и поверхностью стальной пластины также составляет 5 мм. Все размеры индукционной системы представлены на рисунке 1.

На рисунке 2 представлена геометрия индукционной системы, построенная в программном пакете ANSYS. На рисунке видно расположение витков индуктора относительно пластины и воздушной области. Индуктор размещён сверху над заготовкой, что соответствует рассматриваемой схеме нагрева. Такое расположение удобно для моделирования и позволяет оценить, насколько равномерно электромагнитное поле распределяется по поверхности пластины.

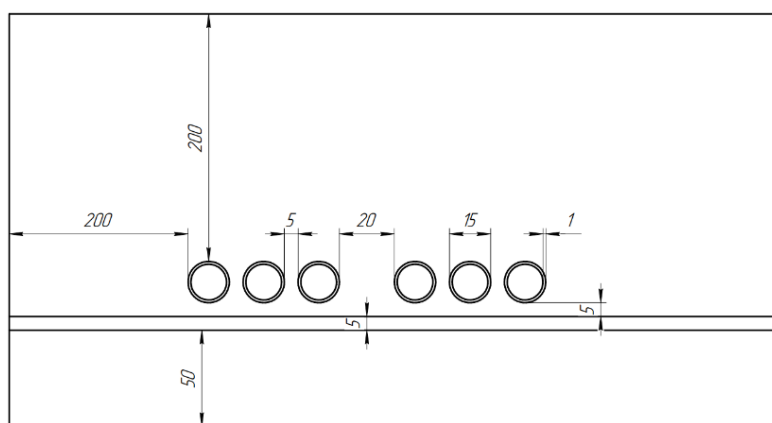


Рис. 1. Размеры индукционной системы

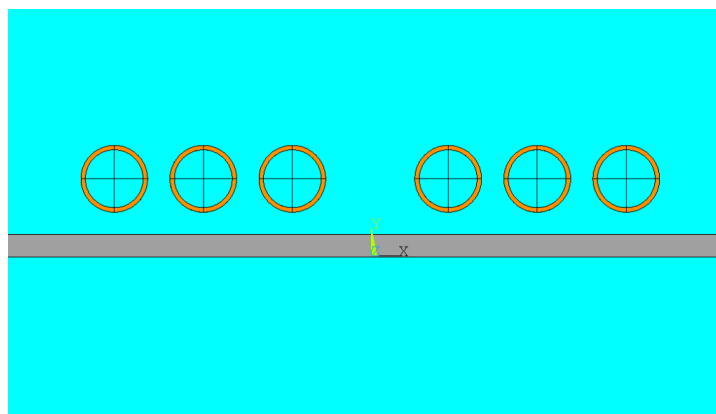


Рис. 2. Геометрия индукционной системы в ANSYS

После создания геометрии выполняется разбиение расчётной области на конечно-элементную сетку, представленную на рисунке 3.

Для рассматриваемой задачи наиболее важной областью является верхняя поверхность стальной пластины, расположенная напротив плоского спирального индуктора, так как именно здесь переменное магнитное поле имеет наибольшую напряжённость, а наведённые вихревые токи создают основные объёмные источники тепла. Поэтому в поверхностном слое пластины сетка должна быть более мелкой, чем в глубине заготовки. Это особенно важно из-за проявления поверхностного эффекта: при индукционном нагреве плотность вихревых токов распределяется по толщине неравномерно, достигает максимальных значений у поверхности и быстро уменьшается по мере удаления от неё. Если в этой зоне использовать слишком крупные элементы, расчёт может неточно определить глубину интенсивного тепловыделения и, как следствие, привести к ошибке при определении температурного поля пластины.

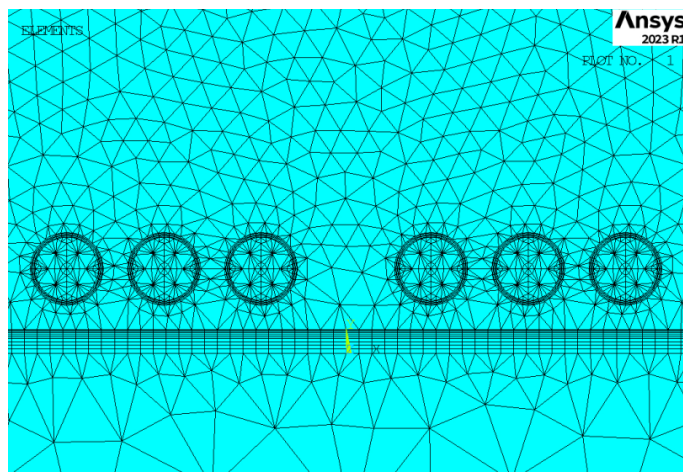


Рис. 3. Конечно-элементная сетка в исследуемой системе

Для электромагнитного расчёта были заданы начальные параметры: частота тока индуктора 75 Гц (подобрана из расчета глубины проникновения тока $\delta=5$ мм) и сила тока в индукторе 5 кА. В результате электромагнитного расчета было получено распределение источников тепла в пластине. На рисунке 4 распределение источников тепла показано под правой группой витков индуктора, так как результат симметричен относительно вертикальной оси.

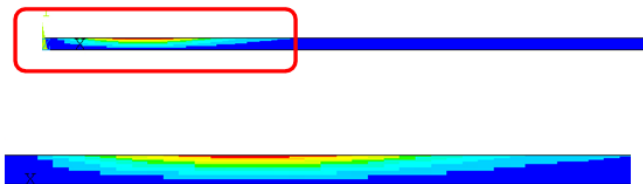


Рис. 4. Распределение источников тепла в увеличенном участке пластины под правой группой витков индуктора

Несмотря на то, что предварительный расчёт частоты выполнялся из условия глубины проникновения тока в стальную заготовку, соизмеримой с толщиной пластины, результаты теплового расчёта показывают, что при начальных параметрах зона интенсивного нагрева сосредоточена только вблизи верхней поверхности заготовки. Поэтому максимальные источники тепла наблюдаются в поверхностном слое, расположенном ближе к индуктору, а нижняя часть пластины остаётся значительно менее нагретой.

Полученный результат показывает необходимость дальнейшей оптимизации режима нагрева: изменения силы тока индуктора и уточнения рабочей частоты. Для проведения тепловых расчетов также необходимо указать время нагрева.

После проведения ряда тепловых расчётов были подобраны оптимальные параметры индукционной системы для более равномерного нагрева пластины до температуры около 1250 °С: частота тока – 500 Гц, ток индуктора – 30 кА и время нагрева – 15 секунд. Распределение температуры в пластине при оптимальных параметрах представлено на рисунке 5.

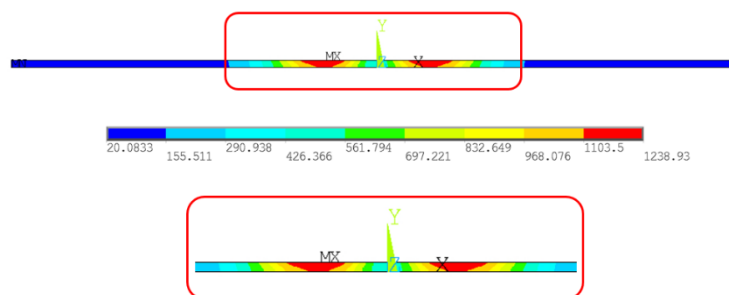


Рис. 5. Распределение температуры в стальной пластине при оптимальных параметрах

При данном режиме максимальная температура в рабочей зоне составила 1239 °С, что практически соответствует требуемой температуре нагрева перед горячей штамповкой. КПД данной индукционной системы составил 44%, что так же является наилучшим результатом среди исследуемых систем.

Список литературы

1. Гребенюк В. Ф., Хомутов В. И., Калмыков Е. В. Выбор конфигурации и расчет индукторов для высокочастотного нагрева: методические указания к курсовому и дипломному проектированию. Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 31 с.
2. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1974. – 164 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. М.: Деан, 2004.

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 VII