

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XXI Международная научно-практическая конференция

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Материалы докладов

г. Томск

26–28 ноября 2025 г.

В трех частях

ЧАСТЬ 2

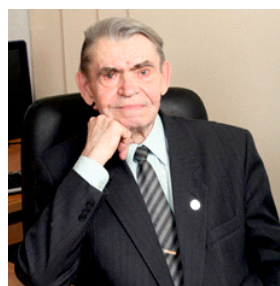
Г.А. Воробьев (1925–2009), д.т.н., автор двух научных открытий в области физики, заслуженный деятель науки и техники РФ. Автор более 180 научных работ, в том числе 5 монографий, более 20 авторских свидетельств.

И.Н. Пустынский (1934–2017), д.т.н., автор более 250 научных работ, в том числе 6 монографий, 7 учебных пособий, 14 изобретений. В 1972–1984 гг. – проректор ТИАСУРа по научной работе, с 1984 по 1999 г. – ректор.

И.П. Чучалин, д.т.н., выдающийся ученый, прошел путь от старшего инженера до директора НИИ ядерной физики. Именно под руководством И.П. Чучалина в 1967 г. вступил в строй действующий – первый в Сибири исследовательский ядерный реактор. Ректор ТУСУРа (1972–1981 гг.), почетный гражданин Томска.
15 октября 2025 г. отметил свой 100-летний юбилей.



Г.А. Воробьев



И.Н. Пустынский



И.П. Чучалин



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)



XXI Международная научно-практическая конференция

*Посвящается 80-летию радиотехнического образования за Уралом
и 100-летнему юбилею со дня рождения великих ученых*

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

26–28 ноября 2025 г.

Материалы докладов

В трех частях

Часть 2

ТУСУР, В-Спектр
Томск, 2025

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965
Э 45

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XXI Международной научно-практической конференции (26–28 ноября 2025 г.): в 3 ч. – Ч. 2. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), 2025. – 306 с.

Electronic Devices and Control Systems: XXI International Scientific-practical Conference (November 26–28, 2025). – Part 2. – Tomsk: TUSUR, V-Spektr, 2025. – 306 p.

ISBN 978-5-902958-48-2

ISBN 978-5-902958-49-9 (Ч. 1)

ISBN 978-5-902958-50-5 (Ч. 2)

ISBN 978-5-902958-51-2 (Ч. 3)

Часть 1 – 2–8 секции.

Часть 2 – 9–15 секции.

Часть 3 – 16–21 секции.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XXI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 26–28 ноября 2025 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; нанoeлектроника СВЧ, интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства; приборы и методы контроля; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; элементная база квантовых технологий, органическая и неорганическая полупроводниковая светотехника; робототехника и мехатроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработки информации; электромагнитная совместимость; искусственный интеллект, информационная безопасность, беспилотные системы; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение; вычислительный интеллект и машинное обучение; цифровая экономика и управление.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3

ББК (Ж/О) 32.84.85.965

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



ISBN 978-5-902958-48-2

ISBN 978-5-902958-50-5 (Ч. 2)

© ТУСУР, 2025

XXI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления»

***Посвящена 80-летию радиотехнического образования за Уралом
и 100-летию юбилею со дня рождения великих ученых***

Иван Петрович Чучалин, доктор технических наук, выдающийся ученый, ректор ТУСУРа (1972–1981 гг.), почетный гражданин Томска.



15 октября отметил 100-летие доктор технических наук, самый молодой в СССР директор НИИ, организатор науки, наставник молодежи, активный общественный деятель, неравнодушный томич, бывший ректор двух университетов – ТПУ и ТИАСУР (ТУСУР) – Иван Петрович Чучалин.

И.П. Чучалин родился 15 октября 1925 г. в г. Артемовске Красноярского края. В 1943 г. был призван в армию. Храбро воевал, был ранен. А в 1946 г. поступил в Томский политехнический институт. В 1955 г. защитил кандидатскую диссертацию. Прошел путь от старшего инженера до директора НИИ ядерной физики. Именно под руководством Чучалина в 1967 г. вступил в строй действующий первый в Сибири исследовательский ядерный реактор.

С 1972 по 1981 г. Иван Петрович был ректором Томского института автоматизированных систем управления и радиоэлектроники, с 1981 по 1990 г. – ректором Томского политехнического института. При этом он продолжал заниматься наукой, подготовил 18 кандидатов и несколько докторов наук. Избирался депутатом Томского городского и областного Совета депутатов трудящихся, членом Томского горкома, райкома и обкома КПСС. Активно участвовал в работе Совета старейшин, внося предложения по дальнейшей разработке стратегии социально-экономического развития Томска.

Иван Петрович – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат конкурса Томской области в сфере образования и науки, почетный гражданин Томска. Награжден орденом Отечественной войны первой степени, двумя Орденами Трудового Красного Знамени, орденом «Знак почета», орденом «За заслуги перед Отечеством» 4-й степени, медалью «За боевые заслуги» и 11 правительственными юбилейными медалями.

Григорий Абрамович Воробьев, доктор технических наук, автор двух научных открытий в области физики, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации.



31 октября исполняется 100 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора, автора научного открытия в области физики диэлектриков Григория Абрамовича Воробьева (1925–2009).

Григорий Абрамович родился 31 октября 1925 г. в селе Убинск Новосибирской области. Будущий ученый в 1948 г. окончил энергетический факультет Томского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта, в 1956 г. получил ученую степень кандидата технических наук, в 1963 г. – доктора технических наук. С 1949 по 1967 г. Григорий Абрамович, работая в Томском политехническом институте, прошел путь от старшего лаборанта до профессора. В 1961 г. совместно с Г.А. Месяцем создал генератор наносекундных импульсов на 40 килоэлектронвольт, а затем на 500 килоэлектронвольт и 1 млн вольт. Доказал наличие эффекта электрического упрочнения. В 1967 г. Воробьев начал трудовую деятельность в ТУСУРе (тогда – Томский институт радиоэлектроники и электронной техники, ТИРЕТ). В ТУСУРе создал научную школу по исследованию электронных процессов в твердых диэлектриках в области сильных электрических полей. Автор более 180 научных работ, в том числе пяти монографий, более 20 авторских свидетельств.

Григорий Абрамович Воробьев внес большой вклад в развитие физической науки в России, в частности, в изучение физики диэлектриков, доказав наличие эффекта электрического упрочнения.

***Поздравления с 75-летием радиотехнического факультета
от выпускников первого набора факультета 1963 г.,
окончивших ТУСУР (ранее ТИРиЭТ) в 1969 г.***

РТФяне!

Дорогие наши радиотехники и радиотехнички!

От студентов тех далеких шестидесятых лет аж прошлого тысячелетия примите наши поздравления и наилучшие пожелания! С праздником!

С праздником восторженных почитателей великого Александра Степановича! С праздником романтиков профессии, дарящей всем самую большую роскошь – роскошь человеческого общения! С праздником тех, кто ищет и находит, находит и не сдаётся!

Желаем всем коллегам новых свершений в нашей замечательной профессии, благополучия и здоровья!

Студенты РТФ ТИРиЭТа, альпинисты клуба ТАКТ из Подмосковья, вся жизнь и работа которых тесно связана с радиотехникой от ее зарождения до наших дней: *Базлов Юрий Александрович*, полковник в отставке, действующий преподаватель ФСБ; *Васильев Геннадий Иннокентьевич*, полковник в отставке, действующий преподаватель академии РВСН; *Васильева Нина Степановна*, начальник отдела АСУ текстильного комбината, на пенсии; *Некрасов Владимир Леонидович*, патентный поверенный ЦАГИ, на пенсии; *Цурпал Александр Николаевич*, действующий ведущий инженер предприятия Роскосмоса.

Дорогому радиотехническому факультету ТУСУРа – с юбилеем!

75 лет – это

- тысячи талантливых выпускников,
- сотни прорывных исследований,
- десятилетия лидерства в радиотехнике.

***От всей души поздравляем коллектив факультета
с этой знаменательной датой!***

Благодарим

- преподавателей – за мудрость и преданность,
- студентов – за любознательность и смелость мыслить нестандартно,
- выпускников – за то, что несут имя РТФ в большую жизнь.

Желаем

- новых научных открытий,
- амбициозных проектов,
- талантливых первокурсников,
- крепкого здоровья и благополучия всем!

Пусть РТФ и дальше остаётся центром инноваций и вдохновения!

С глубоким уважением *Шаталов Вадим Сергеевич*, г. Н. Новгород; *Реснянский Валерий Федорович*, г. Усть-Каменогорск; *Гантимуров Сергей Иннокентьевич*, г. Ангарск; *Петров Юрий Иванович*, г. Томск; *Подойницын Станислав Васильевич*, г. Хабаровск; *Сидоров Егор Тарасович*, г. Владивосток; *Герасименко Александр Николаевич*, г. Владивосток; *Левин Евгений Львович*, г. Санкт-Петербург; *Коренблит Александр Соломонович*, г. Новосибирск; *Арцимович Анатолий Александрович*, г. Омск; *Дарагач Виктор Власович*, г. Уфа; *Некрасов Владимир Леонидович*, г. Жуковский.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – АО «НИИПП»



АО «НИИПП»
niipp@niipp.ru
www.niipp.ru

634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а
Тел.: +7 (382-2) 28-82-88

Достижения науки – в производство!

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» – одно из ведущих предприятий Госкорпорации «Ростех», которая объединяет важнейшие высокотехнологичные предприятия российской промышленности. Предприятие является лидером в области разработки и создания СВЧ-изделий и оптоэлектронных приборов ИК- и видимого диапазонов.

НИИПП основан в Томске в 1964 г. для разработки СВЧ- и оптоэлектронных изделий на основе полупроводниковых соединений АЗВ5. Исследование нового материала – арсенида галлия – предопределило вектор развития предприятия на последующие 60 лет. В 1967 г. на базе института заработал завод по серийному выпуску полупроводниковых приборов. Начинаясь как научный институт, НИИПП и сегодня работает с ведущими вузами Томска: ТУСУР, ТГУ, ТПУ, СибГМУ.

Высокий научно-производственный потенциал подтверждает тот факт, что большинство сотрудников АО «НИИПП» – выпускники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, круг научных интересов которых сложился на производстве во время прохождения практики. АО «НИИПП» и ТУСУР связывают стратегические партнерские отношения. Они основаны на тесной кооперации в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности. В рамках передовой инженерной школы университета предприятие совместно реализует проекты в ключевых областях микроэлектроники, СВЧ- и оптоэлектроники, уделяя особое внимание развитию гражданского приборостроения. Яркими примерами взаимодействия служат разработки по созданию аппаратно-программных комплексов системы мониторинга навигационных огней для речного транспорта и создание телемедицинских комплексов. Кроме того, сотрудничество включает активную работу по стандартизации в рамках Технического комитета 328 «Сверхвысокочастотная и силовая электроника».

География производства с годами расширилась, и в 2022 г. у АО «НИИПП» появилась вторая площадка по производству металлокерамических изделий в Великом Новгороде.

Одним из главных направлений разработок на предприятии было и остается создание СВЧ-полупроводниковых приборов. Здесь были созданы первые отечественные, не имеющие зарубежных аналогов монолитные интегральные схемы мм-диапазона, обладающие уникальным сочетанием технологической простоты, высоких параметров и устойчивости к жестким внешним воздействиям.

За время работы по направлению СВЧ-электроники на предприятии получено более 100 авторских свидетельств и патентов. Отдел СВЧ-электроники НИИПП в числе лидеров в области создания малогабаритных приемопередающих модулей и устройств для систем ближней локации и радиовидения.

Параллельно с СВЧ-электроникой в НИИПП развивалось направление оптоэлектроники – от создания первых ИК-диодов на арсениде галлия (базовая технология которых послужила основой для создания высокоскоростного светодиода и серии мощных излучающих ИК-диодов) до оптоэлектронных приборов, которые нашли широкое применение в аппаратуре космического назначения, в системах атмосферной оптической связи и активно-импульсных приборах ночного видения. Аппараты, в которых применялись изделия оптоэлектроники НИИПП, неоднократно использовались в космических миссиях.

В настоящее время в рамках Указа Президента Российской Федерации, постановлений Правительства и соглашения с Минпромторгом РФ АО «НИИПП» успешно реализует ряд инвестиционных проектов, направленных на достижение технологического суверенитета страны.

В 2022 г. АО «НИИПП» представило уникальный для российского рынка продукт – зондовые станции собственного производства, предназначенные для измерений в области СВЧ-электроники. В 2025 г. полуавтоматическая зондовая станция Тетра-200 стала победителем федерального этапа Всероссийского конкурса «100 лучших товаров России» и вошла в золотую сотню лучших товаров страны.

С 2020 г. АО «НИИПП» входит в состав Союза машиностроителей России, являясь опорным предприятием объединения в регионе. Разделяя ценности и миссию организации, Томский научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов поддерживает развитие науки и промышленного производства на благо социально-экономического развития Томской области и Российской Федерации.

*Генеральный директор АО «НИИПП»
Евгений Александрович Монастырев*

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – АО «НПФ «МИКРАН»



АО «НПФ «Микран»
634041, г. Томск,
пр-т Кирова, д. 51д

Тел.: +7 (382-2) 90-00-29
Факс: +7 (382-2) 42-36-15
www.micran.ru

АО «НПФ «Микран» – ведущий производитель радиоэлектроники России, успешно конкурирующий с зарубежными компаниями. В 1991 г. Виктор Яковлевич Гюнтер с командой из семи человек создал предприятие на базе научной лаборатории Томского института автоматизированных систем управления и радиоэлектроники (сейчас ТУСУР).

Основные направления деятельности сегодня – производство телекоммуникационного оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры и аксессуаров СВЧ-тракта, сверхвысокочастотной электроники и модулей, радаров для навигации и обеспечения безопасности, мобильные комплексы связи, комплексные решения в области связи и автоматизации.

Множество наших разработок являются уникальными: начиная от электронной компонентной базы СВЧ и заканчивая серийными изделиями и комплексными решениями. «Микран» активно внедряет инновационные разработки, контролирует процесс создания технологии и отслеживает качество выпускаемой продукции.

В 2020 г. под эгидой Минпромторга «Микран» был включен в перечень системообразующих организаций Российской Федерации в числе предприятий радиоэлектронной отрасли.

Практически с самого начала своей деятельности «Микран» активно взаимодействует с томскими университетами. В 2012 г. была учреждена стипендия имени основателя «Микрана» В.Я. Гюнтера. На стипендию могут претендовать студенты технических направлений ТУСУРа, НИ ТПУ и НИ ТГУ, которые имеют достижения в учебной, научной, спортивной и общественной деятельности.

Кроме того, с 2019 г. в компании успешно реализуется проект стажировки для студентов и молодых специалистов технических специальностей MICRANstart. Участники стажировки получают возможность работать над реальными проектами компании под руководством опытных наставников, а лучших из них «Микран» приглашает стать частью своей дружной команды.

*Генеральный директор АО «НПФ «Микран»
Вера Юрьевна Парамонова*

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – АО «ИнфоТеКС»



АО «ИнфоТеКС»
127083, г. Москва,
ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

Тел.: 7 (495-7) 37-61-92,
8-800-250-0-260
www.infotecs.ru

АО «ИнфоТеКС» является ведущим разработчиком, а также производителем высокотехнологичных программных и программно-аппаратных средств и систем защиты информации. Входит в топ-10 крупнейших российских компаний в сфере информационной безопасности. Будучи лидером, ИнфоТеКС активно развивает партнёрскую сеть, в которую на данный момент входит свыше 400 компаний. В штате трудоустроено более 1 700 сотрудников, а офисы открыты в 13 городах России.

В портфеле ИнфоТеКС более 50 продуктов для защиты информации, выпускаемых под брендом ViPNet. Среди них решения для защиты каналов связи, решения по обнаружению и пресечению угроз и вторжений, защите серверов и рабочих станций от несанкционированного доступа, решения по защите мобильных устройств и коммуникаций, ИБ АСУ ТП, IoT, криптографические сервисы, криптографические библиотеки, модули для встраивания и др. Продукты ИнфоТеКС регулярно проходят сертификацию в ФСБ России и ФСТЭК России, а также в отраслевых системах сертификации.

ИнфоТеКС – первая российская компания, которая сертифицировала квантово-криптографическую систему выработки и распределения ключей.

ИнфоТеКС выполняет функции ведения секретариата Технического комитета по стандартизации № 26 «Криптографическая защита информации». Специалисты компании также входят в состав Технического комитета по стандартизации № 362 «Защита информации», Технического комитета № 122 «Стандарты финансовых операций», экспертного совета Минцифры по отечественному ПО, являются действующими членами профильных общественных организаций и ассоциаций: АДЭ, АЗИ, ЕВРААС, АРПП, АПКИТ.

Компания «ИнфоТеКС» – одна из немногих компаний на российском ИБ-рынке, которая активно занимается собственными научными исследованиями и разработками. На сегодняшний день группой компаний «ИнфоТеКС» получен 71 патент на изобретения, 4 патента на промышленные образцы и 1 – на полезную модель. Предметом научной и исследовательской деятельности ИнфоТеКС являются передовые технологии информационной безопасности: обнаружение и предотвращение компьютерных атак, аппаратное ускорение технологий защиты информации, методы машинного обучения в задачах ИБ, новые криптографические алгоритмы и их реализация, квантовые технологии и др.

Важным направлением для компании является партнерство и сотрудничество с образовательными учреждениями, поддержка научных разработок и исследовательских проектов, а также обучение и продвижение молодых специалистов. Поэтому уже более 14 лет ИнфоТеКС активно работает над развитием кадрового потенциала в ИТ- и ИБ-отраслях и реализует специальный проект «ИнфоТеКС Академия». В рамках партнерской программы «ИнфоТеКС Академия» организует площадки по обмену опытом, взаимодействует с вузами, колледжами страны, организует стажировки для студентов, проводит грантовую и экспертную поддержку разработок в области информационной безопасности, интегрирует в учебный процесс экспертизу штатных специалистов ГК «ИнфоТеКС».

ИнфоТеКС Академия сотрудничает и заинтересована в сотрудничестве с:

- 1) образовательными учреждениями различного уровня подготовки – школами, колледжами и вузами, желающими сотрудничать с отраслевым партнером по направлению образовательной, научной деятельности, проведению совместных мероприятий;
- 2) партнёрами компании, которые нуждаются в квалифицированных специалистах;
- 3) учредителями и регуляторами различных программ и проектов федерального и регионального уровня в области науки и образования;
- 4) обучающимися и недавними выпускниками вузов, которые хотят получить опыт работы в крупной компании или повысить уровень своих знаний, а также принять участие в различных мероприятиях соревновательного плана.

*Генеральный директор АО «ИнфоТеКС»
Андрей Анатольевич Чапчаев*

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ПЛАНАР»



ООО «ПЛАНАР»
454091, г. Челябинск,
ул. Елькина, д. 32

Тел.: 8-800-222-12-11
www.planarchel.ru
vna@planarchel.ru



Российский производитель
измерительной техники

НОВЫЙ векторный анализатор цепей **серии** **«Компакт-М»**

K201
K203
K204
K206
K209

Компактный. Доступный. Функциональный.

Диапазон рабочих частот: от 9 кГц до 1,5 / 3 / 4,5 / 6,5 / 9 ГГц
Динамический диапазон измерений: 137 / 135 дБ
Диапазон регулирования выходной мощности: от -55 до +5 дБм
До 16 логических независимых измерительных каналов
Время измерения: 24 мкс

**Предоставим демо прибор
по вашему запросу**



planarchel.ru

8 800 222 12 11



Российский производитель
измерительной техники

НОВЫЙ векторный анализатор цепей серии «Кобальт-М»

CM222
CM422
CM244
CM444

Точный. Быстрый. Универсальный.

Диапазон рабочих частот: от 10 МГц до 22/44 ГГц

Время измерения: 10 мкс на точку

Два независимых источника сигнала

Прямой доступ к приемникам

Опция измерений в импульсном режиме



planarchel.ru

8 800 222 12 11

Директор ООО «ПЛАНАР»
Сергей Александрович Заостровных

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО НПК «ТЕСАРТ»



ООО НПК «ТЕСАРТ»
634015, г. Томск,
ул. Циолковского, д. 19, каб. 318

Тел.: +7 (382-2) 90-05-30
office@tes-art.ru
www.tesart.ru

Научно-производственная компания «ТЕСАРТ» – это российский разработчик и производитель комплексных радиоизмерительных систем и прецизионного испытательного оборудования. Компания существует на рынке с 2015 г. благодаря коллаборации инженеров, исследователей, конструкторов и технологов Томского научного центра. Сегодня мы – динамично растущая команда из 120 высококвалифицированных специалистов, чьи решения определяют будущее отрасли.

Мы создаем сложные технические решения, основанные на глубоких исследованиях в области микроволновых измерений, электромехатронных систем, телекоммуникаций и радаров. Основная продукция компании:

- опорно-поворотные устройства и прецизионные позиционеры,
- радиопоглощающий материал,
- безэховые экранированные камеры,
- автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы,
- СВЧ-электроника,
- оборудование спутниковой связи.

За десятилетие мы реализовали свыше 50 крупных проектов, основу которых составляет испытательное оборудование собственного отечественного производства. Наше оборудование выбирают флагманы российской промышленности: Госкорпорации «Роскосмос» и «Ростех», АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», ООО «Бюро 1440» и др. Мы не просто поставляем продукт, мы становимся частью успеха заказчика, обеспечивая полный жизненный цикл – от проектирования до технического сопровождения. Нам важно, чтобы наше испытательное оборудование полностью соответствовало запросам, решало основные задачи, при этом улучшало качество и скорость работы заказчиков.

Мы верим, что будущее создается сегодня, и активно инвестируем в него. С самого основания мы выстраиваем прочные связи с ведущими университетами страны, в первую очередь, Томска. Для студентов и молодых специалистов мы предлагаем не просто стажировку, а **стартовую площадку для карьеры:**

- работать над **реальными проектами** для ведущих корпораций России,
- получить опыт под руководством **действующих экспертов-наставников**,
- влиться в команду единомышленников и воплощать в жизнь самые смелые инженерные идеи.

Мы создаем технологии и ищем тех, кто готов создавать их вместе с нами!

*Директор ООО НПК «ТЕСАРТ»
Артем Олегович Семкин*

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – «50ohm Technologies»

50ohm Technologies

✉ info@50ohm.tech

☎ Тел.: +7-923-408-04-08

🌐 50ohm.tech.ru

📧 fiftyohm

📍 634045, г. Томск

🌐 fiftyohm

«50ohm Technologies» – российская компания из г. Томска. Ее специализация – разработка программного обеспечения для автоматизации измерений, моделирования электронных компонентов и проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных радиоэлектронных устройств. «50ohm Technologies» с 2016 г. успешно помогает предприятиям и инженерам ускорять разработку новых устройств. Миссия компании – помочь специалистам по СВЧ-электронике сосредоточиться на сложных и творческих задачах за счет использования удобных интеллектуальных инструментов, ускоряющих решение технических задач.

Основные направления деятельности «50ohm Technologies»:

- **Автоматизация проектирования СВЧ-устройств:** компания разрабатывает «умные» программные инструменты для проектирования СВЧ-интегральных схем. С помощью методов искусственного интеллекта такие программы автоматически генерируют варианты схем и топологий (например, усилителей, аттенюаторов, фазовращателей) на основе заданных требований и элементной базы. Инженер получает сразу несколько готовых проектов и выбирает оптимальный, что значительно ускоряет самый сложный этап разработки и избавляет от рутинных операций.

- **Моделирование электронных компонентов:** «50ohm Technologies» обладает большим опытом в создании точных моделей пассивных и активных компонентов для полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$. Компания поставляет эти модели в формате комплекта средств проектирования (PDK) для популярных САПР. Автоматизация расчётов и применение собственных методик экстракции позволяют значительно сократить затраты времени и средств при разработке новых изделий.

- **Автоматизация измерений и испытаний:** «50ohm Technologies» создаёт программно-аппаратные комплексы для автоматизированного тестирования радиоэлектронных устройств на базе оборудования заказчика. Готовые сценарии измерений для типовых компонентов и приборов позволяют значительно сократить время испытаний и снизить вероятность ошибок. Внедрение таких решений повышает эффективность работы измерительной лаборатории предприятия без необходимости приобретения дорогостоящих сторонних систем.

Опираясь на передовые технологии и экспертизу команды, «50ohm Technologies» обеспечивает своим партнерам ускорение цикла разработки и улучшение качества результатов. Решения компании уже помогли ряду предприятий сократить сроки вывода продуктов на рынок и оптимизировать издержки. «50ohm Technologies» поддерживает научно-техническую конференцию и развитие профессионального сообщества. Компания открыта к сотрудничеству и нацелена и дальше оставаться надёжным партнёром для организаций радиоэлектронной отрасли.

Директор ООО «50ом Технолоджиз»
Алексей Анатольевич Калентьев



Секция 9
ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
(стр. 17 – 46)

Секция 10
ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
(стр. 47 – 4)

Секция 11
ОРГАНИЧЕСКАЯ И НЕОРГАНИЧЕСКАЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА
(стр. 55 – 96)

Секция 12
РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА
(стр. 97 – 126)

Секция 13
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
(стр. 127 – 180)

Секция 14
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ
(стр. 181 – 214)

Секция 15
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕСПИЛОТНЫЕ СИСТЕМЫ
(стр. 215 – 300)

СОДЕЖАНИЕ
(стр. 301 – 306)

Секция 9

ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – Окс Ефим Михайлович,
зав. каф. физики, проф., д.т.н.*

К.С. Ларин, И.Ю. Бакеев

Моделирование процессов генерации плазмы в тлеющем разряде с полым катодом

Рассмотрена модель осцилляции вторичных быстрых ионизирующих электронов тлеющего разряда с полым катодом, осуществляющая имитационное движение этих электронов в газонаполненной катодной полости с учетом прикатодных отражений и рассеяния на молекулах газа.

Ключевые слова: тлеющий разряд с полым катодом, осцилляция электронов, моделирование, метод Монте-Карло, рассеяние электронов.

В настоящее время всё большее распространение получают нетрадиционные методы обработки материалов, в том числе методы, связанные с воздействием на материалы сконцентрированными потоками энергии [1, 2]. К таким относится электронно-лучевой метод [3] модификации поверхностных слоёв материалов, в том числе, диэлектрических в форвакуумной области давлений.

Генерация электронного пучка при данных повышенных давлениях, нетрадиционных для использования в классических пучково-плазменных устройствах, производится за счет эмиссии электронов из плазмы [4], создаваемой газовыми разрядами (тлеющим или дуговым), выбираемыми на основе критериев к режимам электронно-пучкового взаимодействия. Так, получение непрерывного электронного пучка требует использования для создания эмиссионной плазмы стационарного тлеющего разряда, осуществление эффективной ионизации рабочего газа в котором обеспечивается за счет осцилляции электронов в катодной полости, выступающей в качестве электростатической ловушки [5]. Физика функционирования тлеющего разряда с полым катодом, в том числе закономерности, связанные с осцилляцией электронов, достаточно хорошо изучены [5] и позволяют осуществлять качественный анализ различных газоразрядных систем, основанных на этом разряде.

Однако последние экспериментальные исследования [6] режимов функционирования тлеющего разряда с полым катодом и эмиссии электронов из создаваемой им плазмы в форвакуумном плазменном источнике продемонстрировали расхождения с предполагаемыми в классической теории тлеющего разряда с полым катодом представлениями об изотропном распределении скоростей осциллирующих электронов [5]. Объяснение причин такого расхождения требует привлечения более точных имитационных методов компьютерного моделирования.

Цель данной работы заключалась в разработке физико-математических положений модели осцилляции быстрых ионизирующих электронов в катодной полости на основе имитационных методов моделирования [7].

Модель

В данной работе ударения электрона о стенки полости и соударения с частицами плазмы приняты

абсолютно упругими. Упругое рассеяние электронов моделируется по методу Монте-Карло [8].

Между ударами электрон движется равномерно. Его движение рассматривается в декартовой системе координат, где точка отсчёта находится в центре верхнего основания полости, а ось Z направлена вниз. Помимо проекций скорости электрона на оси рассматриваются также углы скорости: α – с положительным направлением оси X в плоскости XY (угол проекции скорости на XY с осью X), β – с положительным направлением оси Z . Эти углы задают направление скорости электрона. Так как модуль скорости неизменен, при ударах о стенки изменяются только углы α и β . Полость – цилиндр высотой h , диаметром основания d с частично закрытым нижним торцом, имеющим апертуру диаметром d_a .

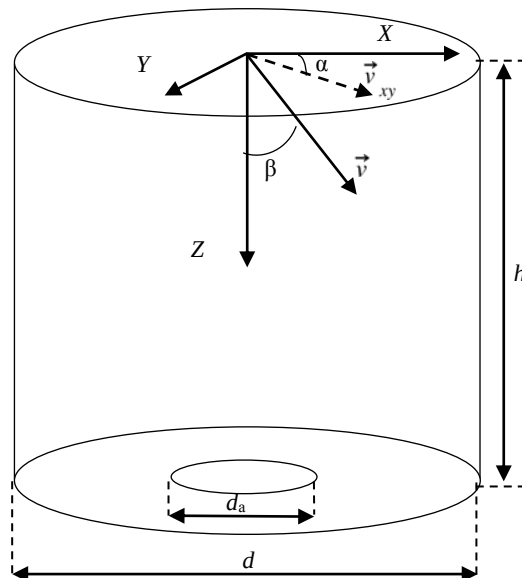


Рис. 1. Схема полости.

Представлены система координат и углы α и β

Движение электрона рассчитывается по точкам с временным интервалом τ , рассчитываемым исходя из скорости электрона и размеров полости.

Электрон может испытывать ударение о три поверхности: боковую поверхность цилиндра, нижнюю грань и верхнюю грань.

Так как α отвечает только за движение в плоскости XY , то при столкновении электрона с нижним или верхним основанием меняется только угол β , в

то время как α остаётся неизменным. В случае столкновения с верхним или нижним основанием угол $\beta_{в-н}$ меняется по (1). Схема столкновения с верхним основанием на рис. 2.

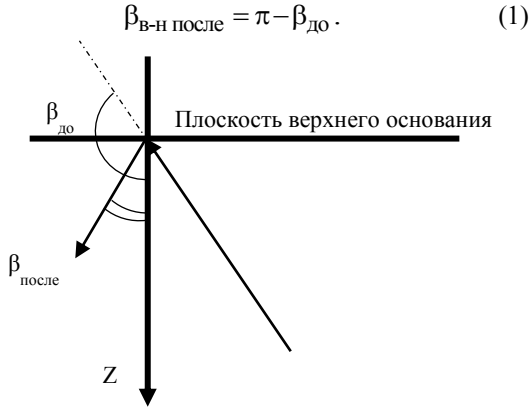


Рис. 2 Столкновение электрона с верхним основанием. Промонстрирована плоскость падения и отражения электрона

При столкновении электрона со стенками (x_s, y_s) – координаты точки столкновения электрона со стенкой, (x_0, y_0) – координаты точки нахождения электрона, предшествующей столкновению. По ним можно рассчитать прямую a , вдоль которой двигалась частица. Из координат точки (x_s, y_s) рассчитывается прямая b , проходящая через неё от начала отсчёта в плоскости XY. При зеркальном отражении a относительно b получается прямая c , вдоль которой будет двигаться электрон. Из координат точки (x_1, y_1) на прямой c , в которой будет частица после удара, рассчитывается угол α . Формулы (2)–(4) – конечные результаты преобразований по этому способу. Этот способ достаточно прост для выполнения и в декартовых координатах, в конечном итоге приводит к трём формулам и учитывает кривизну стенки (так как отражение происходит относительно прямой b , проходящей через данную точку окружности).

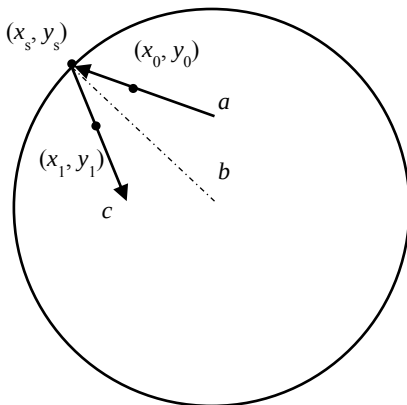


Рис. 3. Отражение от боковой стенки

В случае столкновения с боковой поверхностью меняются оба угла по (2) и (5).

$$\alpha = \frac{-y_s}{|y_s|} \cdot \arccos \left(\frac{x_1 - x_s}{\sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}} \right), \quad (2)$$

$$x_1 = 2 \cdot \frac{y_0 \cdot x_s \cdot y_s + x_0 \cdot x_s \cdot x_s}{y_s^2 + x_s^2} - x_0, \quad (3)$$

$$y_1 = 2 \cdot \frac{y_s \cdot \frac{y_0 \cdot x_s \cdot y_s + x_0 \cdot x_s \cdot x_s}{y_s^2 + x_s^2}}{x_s} - y_0, \quad (4)$$

$$\beta_{бок после} = 2 \cdot \pi - \beta_{до}. \quad (5)$$

В случае если электрон попадает в отверстие в нижнем основании, он покидает катодную полость.

По (6) рассчитывается длина свободного пробега λ – средний путь, который пройдёт электрон между двумя последовательными столкновениями с частицами.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \sigma}, \quad (6)$$

где n – концентрация атомов и ионов в плазме, σ – эффективное сечение взаимодействия (для приближённой оценки можно принять σ равной площади сечения атома).

Используя (6) и случайную величину ω , равномерно распределённую на интервале (0, 1), можно задать расстояние, которое электрон пройдёт без столкновений.

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot R_a^2} \cdot \ln \frac{1}{1 - \omega}, \quad (7)$$

где R_a – радиус атома.

Когда электрон преодолевает расстояние l , он испытывает очередное столкновение и отклоняется от своего первоначального направления движения на некоторый угол ϕ , моделируемый случайным образом методом Монте-Карло согласно формуле Резерфорда [9].

$$\phi = 2 \cdot \arcsin \sqrt{\frac{16 \cdot \pi \cdot a \cdot n \cdot \left(\frac{Z \cdot q^2}{m \cdot V^2} \right)^2}{1 - \gamma}}, \quad (8)$$

где Z – зарядовое число, m – масса электрона, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, q – заряд электрона, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, V – скорость электрона, a – толщина газового слоя, γ – случайная величина, равномерно распределённая на интервале (0, 1), отражающая случайность прицельного параметра при столкновении электрона с атомом.

Для получения нового направления движения случайно выбирается вектор, который с прежним вектором движения образует угол ϕ .

Результаты

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования: траектории движения электрона в катодной полости при температуре 500 К и давлении 10 и 100 Па соответственно. На рисунках видны отражения электронов от стенок; точками выделены акты рассеяния на атомах газа, они приводят к некоторому изменению характера движения электронов. При более высоком давлении траектория распространения электронов имеет больше изломов, так как количество актов рассеяния и изменения траектории движения электронов выше.

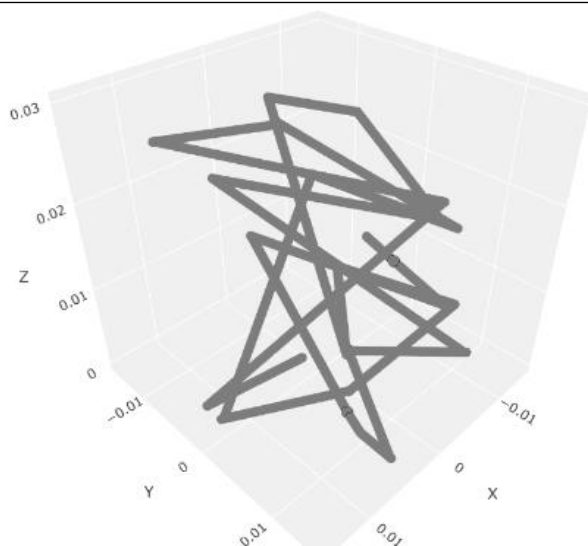


Рис. 4. Траектория движения электрона при 10 Па

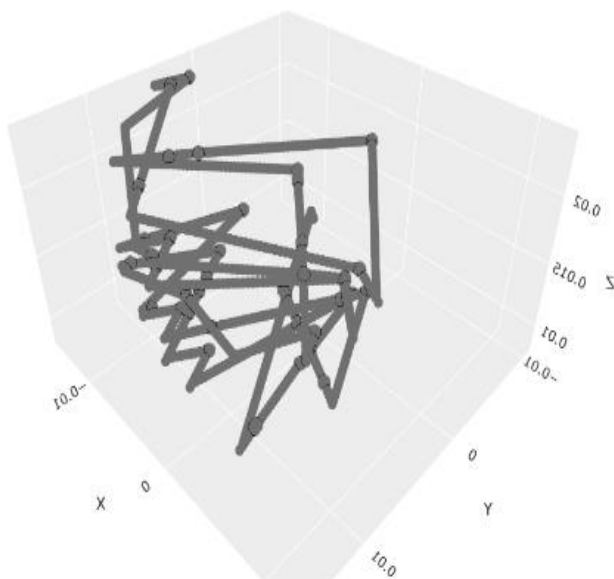


Рис. 5. Траектория движения электрона при 100 Па

Заключение

Сформулированы физико-математические положения расчёта осцилляции электронов в катодной полости, обеспечиваемой электростатическим отражением от стенок катодной полости с учетом рассеяния электронов на молекулах рабочего газа. Сопоставление полученных в ходе моделирования траекторий электронов для двух различных давлений продемонстрировало наглядное изменение характера осцилляции с превалированием изменений траекто-

рии в актах рассеяния для большего давления. В последующем данная модель будет использована для анализа характера распределения скоростей осциллирующих электронов и прогнозирования режимов функционирования газоразрядных систем на основе тлеющего разряда с полым катодом.

Литература

1. Prospects and challenges in application of gamma, electron and ion beams in processing of nanomaterials / A.G. Chmielewski, D.K. Chmielewska, J. Michalik, M.H. Sampa // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – Vol. 265, No. 1. – P. 339–346.
2. Krashenninnikov A.V. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials / A.V. Krashenninnikov, K. Nordlund // Journal of applied physics. – 2010. – Vol. 107, No. 7.
3. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: М-Принт, 2005. – 212 с.
4. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во ТГУ, 2014. – 288 с.
5. Kolobov V.I. Glow discharges with electrostatic confinement of fast electrons / V.I. Kolobov, A.S. Metel // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Vol. 48, No. 23. – P. 233001.
6. Influence of Hollow Cathode Geometry on the Parameters of a Forevacuum Plasma Electron Source / I. Bakeev, A.S. Klimov, E.M. Oks, A. Zenin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2025. – Vol. 53, No. 5. – P. 922–927.
7. Кагарманов И.А. Имитационное моделирование: сущность, методы и особенности // Современные научные исследования и инновации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2024/11/102839>, свободный (дата обращения: 10.09.2025).
8. Соболев И.М. Метод Монте-Карло // Популярные лекции по математике. – М.: Наука, 1968. – Вып. 46. – 64 с.
9. Золотухин Д.Б. Моделирование методом Монте-Карло упругого и неупругого рассеяния электронного пучка в газе / Д.Б. Золотухин, В.А. Бурдовицин // Доклады ТУСУР. – 2012. – Т. 26, ч. 2. – С. 55–58.

Ларин Кирилл Сергеевич

Студент каф. электронных приборов ТУСУРа
Эл. почта: kirilllarinz111@gmail.com

Бакеев Илья Юрьевич

Канд. техн. наук, с.н.с. лаб. плазменной электроники
каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: bakeeviyu@mail.ru

Л.Ж. Нгон А Кики, Ф.А. Суховольский, В.А. Бурдовицин

О взаимосвязи между параметрами эмиссионной плазмы и электрической прочностью ускоряющего промежутка плазменного электронного источника

Рассмотрены некоторые аспекты, определяющие электрическую прочность ускоряющего промежутка в форвакуумном электронном источнике с плазменным катодом, использующем гелий и аргон в качестве рабочего газа. Проникновение плазмы в ускоряющий промежуток является причиной пробоя. Обнаружено, что пробой промежутка происходит при большем диаметре эмиссионного отверстия и при более высокой плотности плазмы в гелии, чем в аргоне. Большая стабильность эмиссионной границы плазмы в гелии объясняется наблюдаемым большим падением анодного потенциала и, следовательно, большей толщиной слоя пространственного заряда.

Ключевые слова: форвакуумный плазменный электронный источник, эмиссионный канал, предельные параметры плазмы, ускоряющий промежуток, электрическая прочность.

Важнейшим элементом конструкции плазменного электронного источника является эмиссионный электрод, представляющий собой решетку, изготовленную из тугоплавкого металла и содержащую эмиссионные отверстия. Решетка выполняет двоякую роль. Во-первых, в ее отверстиях устанавливается граница плазмы, с которой эмитируются электроны. Во-вторых, решетка совместно с ускоряющим электродом формирует промежуток, в котором происходит ускорение электронов.

Положение эмиссионной границы плазмы определяется несколькими факторами, в частности, соотношением между протяженностью слоя, отделяющего плазму от электрода, и диаметром эмиссионного отверстия, а также напряженностью электрического поля в ускоряющем промежутке, оказывающего давление на плазму.

Согласно современным представлениям [1], нарушение электрической прочности ускоряющего промежутка может происходить по двум причинам. Первая связана с потерей устойчивости плазменной границы, в результате чего плазма «проваливается» в ускоряющий промежуток с последующим развитием низковольтного сильноточного разряда и резким падением ускоряющего напряжения. Этот эффект называется «плазменным пробоем». Вторая причина обусловлена межэлектродным пробоем, вызванным развитием разряда между электродами ускоряющего промежутка вследствие высокой напряженности поля и наличия газа. Роль газа в реализации межэлектродного пробоя очевидна, поскольку ускоренные электроны участвуют в его ионизации. Влияние газа на плазменный пробой целенаправленно не изучалось и является предметом настоящего исследования.

Методика эксперимента

Определение предельных параметров плазменного электронного источника проводилось в электродной схеме, представленной на рис. 1. Эмиссионная плазма 1 формировалась в разряде с полым катодом 2. Разряд поддерживался напряжением U_d . Анод 3 содержал решетку 4 с эмиссионными отвер-

стиями. К аноду 2 и электроду 5 приложено напряжение U_a , обеспечивающее ускорение электронов до необходимых энергий. Электронный пучок 6 улавливался коллектором 7.

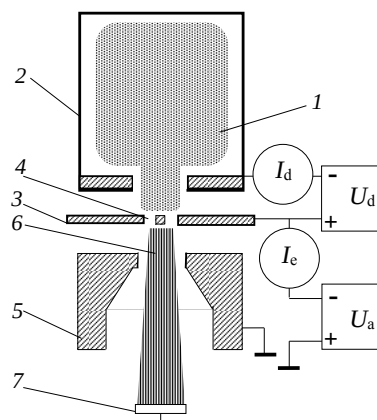


Рис. 1. Схема измерений предельных параметров

Решетка 4 изготовлена из листа нержавеющей стали толщиной 1 мм и содержала 4 эмиссионных отверстия, диаметр которых варьировал в интервале 0,7–1,3 мм. В качестве рабочего газа использовались аргон и гелий. Эксперимент проводился следующим образом. При фиксированном давлении газа и минимальном токе разряда устанавливалось ускоряющее напряжение U_a в интервале от 5 до 10 кВ. После этого производилось повышение разрядного тока I_d до возникновения пробоя ускоряющего промежутка, что определялось по резкому возрастанию тока I_e с одновременным спадом напряжения на ускоряющем промежутке. В момент, предшествующий пробую, фиксировались значения разрядного I_{dm} и эмиссионного I_{em} токов.

Для установления соответствия между током разряда и параметрами плазмы были выполнены измерения с помощью одиночного ленгмюровского зонда, вставленного со стороны ускоряющего промежутка. Напряжение U_a при этом отсутствовало. Схема зондовых измерений показана на рис. 2.

Одиночный зонд 1 был введен через отверстие в анодном электроде 2 в разрядную (эмиссионную) плазму 3. Разрядный ток измерялся в цепи анод 3 – катод 4. Катодная полость на рис. 2 не показана. Генератор 5 пилообразного напряжения подключен к зонду через резистор R , напряжение с которого подавалось на два входа осциллографа Tektronix 2004B.

Сигнал с точки A рассматривался как напряжение на зонде, изменяющееся в соответствии с временной разверткой осциллографа. Разностный сигнал, полученный с помощью режима «mathematics», пропорциональный зондовому току, использовался для обработки на основе теории OML (orbital motion limit) [2]. Типичный вид картины с экрана осциллографа, представленный на рис. 3, содержит напряжения в точках A и B , а также разностный сигнал, представляющий собой, по сути, вольт-амперную характеристику зонда.

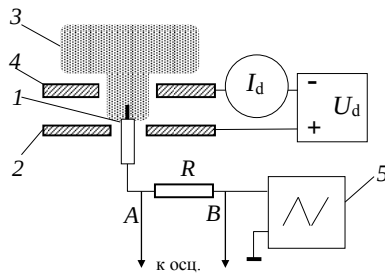


Рис. 2. Схема зондовых измерений

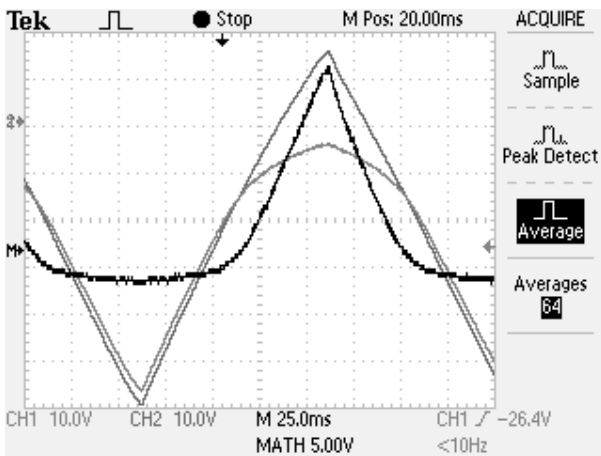
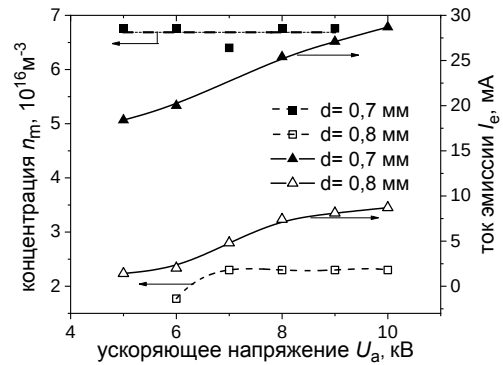


Рис. 3. Картина с экрана осциллографа

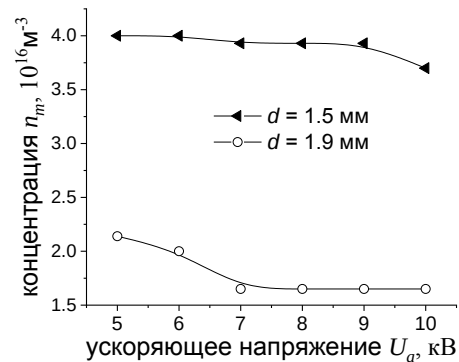
Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 4 представлены зависимости предпробойной концентрации n_m плазмы и тока I_{em} от напряжения U_a при разных диаметрах эмиссионных отверстий для аргона и гелия. Тот факт, что с повышением U_a возрастает I_{em} и не изменяется предельная концентрация n_m плазмы, свидетельствует в пользу «плазменного» типа пробоя. Повышение эмиссионного тока за счет увеличения диаметра отверстий не вызывает смещения кривой в сторону меньших напряжений. Это означает, что пробой происходит в тот момент, когда концентрация плазмы достигает величины, достаточной для проникновения в ускоряющий промежуток. Показательна за-

висимость предельной концентрации плазмы от диаметра отверстий для разных газов (рис. 5). Для аргона пробой наступает при меньших диаметрах отверстий и при меньших концентрациях плазмы. Это означает, что аргоновая плазма легче проникает через эмиссионные отверстия в ускоряющий промежуток. Причины такого различия связаны, по-видимому, со свойствами плазмы.



а



б

Рис. 4. Предельные значения концентрации n_m плазмы и эмиссионного тока I_{em} в зависимости от ускоряющего напряжения U_a для разных диаметров d эмиссионных отверстий. Рабочий газ:

а – аргон (2,7 Па), б – гелий (4,3 Па)

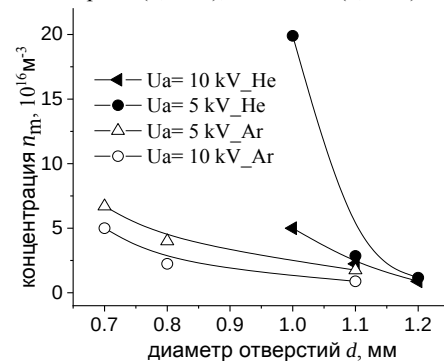


Рис. 5. Предельные значения концентрации n_m плазмы в зависимости от диаметра d отверстий в эмиссионном электроде

Измерения таких параметров плазмы, как ионная концентрация, а также электронная температура, выполненные с помощью одиночного лентмюровского зонда, позволили обнаружить отличия для гелиевой и аргоновой плазмы по электронной температуре (рис. 6). Кроме того, значения потенциала фр

плазмы, измеренные эмиссионным зондом, заметно различаются (рис. 7).

Для обоих газов $\varphi_p < 0$, и для гелия φ_p более отрицателен по сравнению с аргоном. Это означает, что в использованной электродной системе реализуется режим с положительным анодным падением потенциала, т.е. вблизи анода существует слой отрицательного пространственного заряда [3].

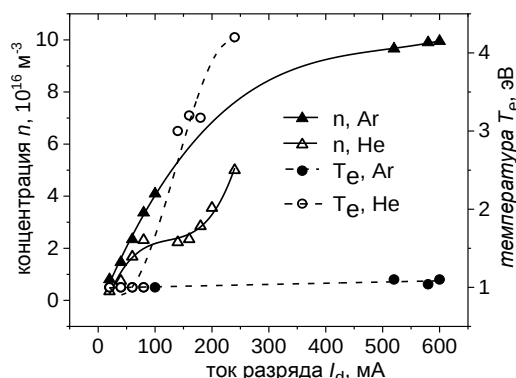


Рис. 6. Концентрация n плазмы и электронная температура T_e в зависимости от разрядного тока I_d для гелия и аргона. Давление $p = 2,7$ Па

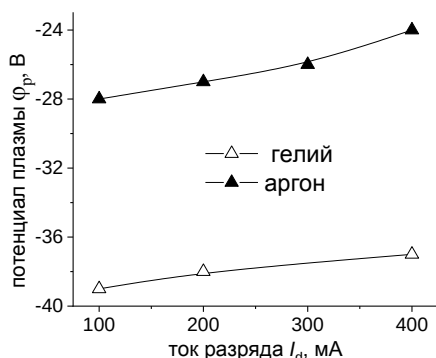


Рис. 7. Потенциал φ_p плазмы как функция разрядного тока для разряда в гелии и аргоне. Давление $p = 2,7$ Па

Согласно известному закону степени «трех вторых» (1), большее падение U_s потенциала при тех же токе I и площади S_a анода означает большую протяженность d -слоя.

$$I = \frac{4}{9} \cdot \epsilon_0 \sqrt{2 \frac{e}{m}} \frac{S_a}{d^2} U_s^{3/2}. \quad (1)$$

Это, в свою очередь, может объяснить большую устойчивость плазменной границы при использовании гелия в качестве рабочего газа.

Заключение

При давлении газа 2,7–7 Па и ускоряющем напряжении 5–10 кВ в форвакуумном плазменном электронном источнике реализуется «плазменный» пробой, вызванный проникновением плазмы через эмиссионные отверстия в ускоряющий промежуток. Пробой возникает при повышении концентрации плазмы и снижении протяженности слоя, отделяющего плазму от эмиссионного электрода.

Протяженность слоя определяется также падением напряжения на нем, которое для гелиевой плазмы существенно больше, чем для аргонной. Это обстоятельство, по нашему мнению, объясняет более высокую электрическую прочность ускоряющего промежутка при использовании гелия в качестве рабочего газа.

Литература

1. Влияние рода газа на электрическую прочность ускоряющего промежутка форвакуумного плазменного источника электронов / В.А. Бурдовин, И.Ю. Бакеев, К.И. Карпов, Л.Ж. Нгон А Кики, Е.М. Окс // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 11. – С. 26–30.
2. Francis F. Chen. Langmuir Probe Diagnostics// Mini-Course on Plasma Diagnostics // IEEE-ICOPS, Korea, June 5, 2003. <https://www.seas.ucla.edu/~ffchen/Publs/Chen210R.pdf>
3. Цендин Л.Д. О величине и знаке прианодного падения потенциала в газовом разряде // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 154–158.

Нгон А Кики Лионель Жозель

Аспирант каф. физики ТУСУРа

Эл. почта: joelngon52@gmail.com

Суховольский Федор Александрович

Студент ТУСУРа

Эл. почта: spectrumz@yandex.ru

Бурдовин Виктор Алексеевич

Вед. науч. сотр. каф. физики ТУСУРа

Эл. почта: burdov@fet.tusur.ru

А.С. Климов, Ж.Э. Дагри, А.В. Долгова

Обработка полимеров с использованием пучковой плазмы в диапазоне давлений 0,1–10 Па

Исследовано влияние параметров пучковой плазмы, генерируемой ленточным электронным пучком при давлении 0,1–10 Па на модификацию поверхностных свойств полипропилена в атмосферах аргона и воздуха. Установлено, что при давлении 1 Па в аргоне наблюдается немонотонный рост концентрации плазмы (до $3 \times 10^{15} \text{ м}^{-3}$), связанный с зажиганием пучково-плазменного разряда, тогда как для воздуха зависимость параметров плазмы от давления носит монотонный характер. Показано, что обработка в воздушной плазме обеспечивает более выраженное снижение краевого угла смачивания по сравнению с аргонной плазмой, что объясняется комбинированным физико-химическим воздействием активных компонентов воздуха.

Ключевые слова: электронный пучок, плазма, полипропилен, смачиваемость, шероховатость.

Уникальные свойства полимерных материалов, такие как низкая тепло- и электропроводность, химическая инертность и стойкость к агрессивным средам, высокая прочность при низком весе и плотности, обуславливают их широкое применение в ключевых отраслях промышленности, включая микроэлектронику, биомедицину, аэрокосмическую и упаковочную индустрии. Особое место среди полимеров занимают полиолефины, в частности, полиэтилен и полипропилен, что связано с их исключительными механическими и диэлектрическими характеристиками [1]. Однако низкая поверхностная энергия и, как следствие, плохая адгезия к другим материалам существенно ограничивают потенциал их практического использования. Данный факт стимулирует активный поиск эффективных и универсальных методов поверхностной модификации [2].

К существующим подходам модификации полимеров относятся химическое травление, эффективно увеличивающее шероховатость поверхности; обработка коронным или барьерным разрядом, улучшающая адгезионные свойства, а также лазерная обработка, обеспечивающая высокую точность. Тем не менее каждый из этих методов имеет существенные недостатки: химическое травление экологически небезопасно, плазменная обработка в разрядах низкого давления часто требует вакуумного оборудования, а лазерная может вызывать термическую деградацию материала и отличается высокой стоимостью. Методы на основе высокоэнергетических электронных пучков, в свою очередь, требуют тщательного подбора дозы облучения и применимы к ограниченному кругу материалов [3].

Перспективной альтернативой выступают комбинированные пучково-плазменные технологии, сочетающие преимущества плазменной обработки и воздействия электронным пучком. Ключевая особенность данного метода заключается в генерации низкотемпературной неравновесной плазмы (с электронной температурой 1–5 эВ и ионной не более 300–500 К) при взаимодействии электронного пучка с газовой средой. Это позволяет модифицировать поверхность без риска термического повреждения даже термочувствительных полимеров. Важнейшим

преимуществом является высокая химическая активность такой плазмы, обусловленная генерацией значительной концентрации реакционноспособных частиц – радикалов, ионов и возбужденных молекул. Оптимальные с точки зрения обработки полипропилена условия – вакуум 0,1–10 Па, газ аргон или кислород, время обработки 5–300 с [4].

Форвакуумный источник ленточного электронного пучка с двухступенчатой разрядной системой позволяет создавать поток электронов с энергией до 5 кэВ и током 400 мА в диапазоне давлений 0,1–10 Па. Концентрация пучковой плазмы, генерируемой за счет прохождения электронного пучка в вакуумной камере, может достигать 10^{16} м^{-3} . Параметры пучковой плазмы определяются параметрами электронного пучка (током пучка и энергией электронов), давлением и родом плазмообразующей среды. Особенность источника с двухступенчатой разрядной системой – возможность генерации электронного пучка ленточной конфигурации в широком диапазоне давлений [5]. Ожидается, что степень влияния пучковой плазмы будет определяться как параметрами самой плазмы, так и средней длиной пробега заряженных частиц, поступающих из плазмы на облучаемую поверхность.

Цель настоящего исследования состояла в определении влияния режимов обработки полипропилена в диапазоне давлений 0,1–10 Па с использованием пучковой плазмы на его смачиваемость и морфологию поверхности, что, как правило, используется для выявления эффективности обработки.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки и расположение полимерных подложек во время плазменной обработки показаны на рис. 1. Источник ленточного электронного пучка состоял из полого катода основного разряда, плоского анода с протяженным эмиссионным отверстием и ускоряющего электрода (экстрактор). Эмиссионное окно в аноде было выполнено в виде прямоугольника длиной 20 см и шириной 1 см, покрытого металлической сеткой. Полые катоды вспомогательных разрядов располагались на концах полого катода основного разряда. Анод в этих разрядных системах был катодом ос-

нового разряда. Газ вводился в полые катоды вспомогательных разрядов.

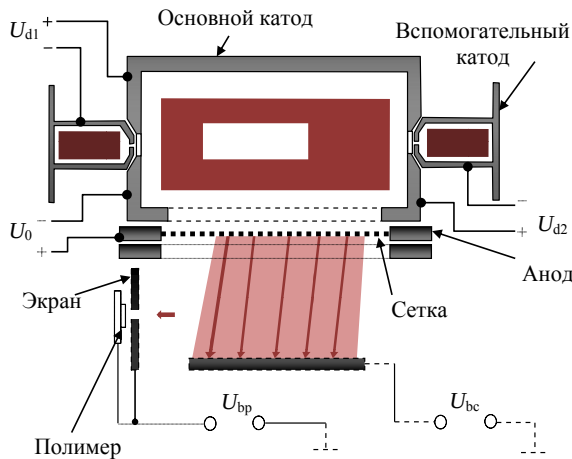


Рис. 1. Схема эксперимента по обработке полипропилена в пучковой плазме

В качестве рабочего газа использовались аргон высокой чистоты и воздух. Отверстие между полым катодом вспомогательного разряда и основным катодом было выполнено диаметром 1 мм. Такое небольшое отверстие, с одной стороны, позволяло частицам плазмы вспомогательного разряда проникать в основной катод, а с другой – обеспечивало разность давлений между полыми катодами основного и вспомогательного разрядов. Из-за подачи газа вспомогательный разряд с полым катодом не требовал высоких напряжений для зажигания.

В качестве материала подложки использовался полипропилен в виде пластин толщиной 2 мм и размером 20×20 мм². Перед обработкой подложки очищали от органических загрязнений и пыли с помощью ультразвуковой ванны с изопропиловым спиртом в течение 10–15 мин с последующей сушкой в течение 20 мин. Затем устанавливали на термостабильную подставку в вакуумной камере. Опора состояла из медной пластины, установленной на перемещающем устройстве. Между подложкой и пучковой плазмой был установлен теплозащитный экран с отверстием, закрытым сеткой. Размер отверстия был на несколько миллиметров меньше, чем размеры подложек. Расстояние между средней плоскостью электронного пучка и подложкой составляло 8 см, расстояние между теплозащитным экраном и подложкой 1 см.

Экран позволил уменьшить нагрев полипропиленовых подложек и защитить подложки от частиц плазмы до тех пор, пока электронный пучок и параметры плазмы не достигнут необходимого режима. Электронный пучок создавал на своем пути пучковую плазму. Было возможно обеспечить потенциал коллектора U_{bc} . Предполагалось, что таким образом можно будет контролировать параметры пучковой плазмы и степень обработки. Для измерения параметров плазмы использовался одиночный зонд Ленгмюра.

Результаты и обсуждение

Время обработки всех подложек было выбрано из условия, чтобы не происходило значительного нагрева их поверхности. В среднем время обработки составляло 10 мин. Температура подложек по истечении данного времени достигала максимум 80°C , что не является критичным для полипропилена. Измерение смачиваемости подложек после обработки осуществлялось по стандартной методике с использованием дистиллированной воды (рис. 2).



Рис. 2. Фотография капли на поверхности подложки

Как показали эксперименты, уменьшение давления приводит к снижению концентрации пучковой плазмы за счет сокращения частоты взаимодействия электронов пучка с молекулами рабочего газа. В области давлений 1 Па наблюдается некоторый рост концентрации и температуры электронов плазмы в среде аргона (рис. 3) [7].

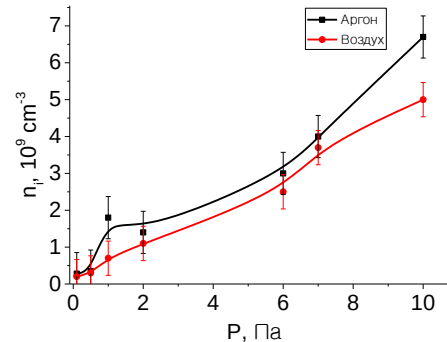


Рис. 3. Зависимость концентрации пучковой плазмы от давления для аргона и воздуха

Наиболее вероятная причина такого немонотонного изменения параметров плазмы – зажигание пучково-плазменного разряда, при котором передача энергии от электронов пучка плазменным электронам возрастает. Зажигание такого типа разряда сопровождается и усилением яркости свечения пучковой плазмы, наблюдаемым визуально. Стоит отметить, что при токе пучка 100 мА и энергии электронов 2 кэВ инициирование и существование пучково-плазменного разряда неустойчиво [8]. При повышении тока пучка до 200 мА пучково-плазменный разряд в аргоне зажигался более стабильно. Для воздуха параметры плазмы изменялись монотонно во всем диапазоне давлений. Очевидно, условия для существования пучково-плазменного разряда при заданных параметрах электронного пучка (ток 100

мА и энергия электронов 2 кВ) не выполнялись. Полученная с помощью электронного пучка плазма использовалась для обработки полимерных подложек из полипропилена. В течение получаса после извлечения подложек измерялось значение краевого угла смачивания их поверхности деионизованной водой. На рис. 4 представлена зависимость контактного угла смачивания поверхности полипропилена после обработки в аргоне и воздухе [9].

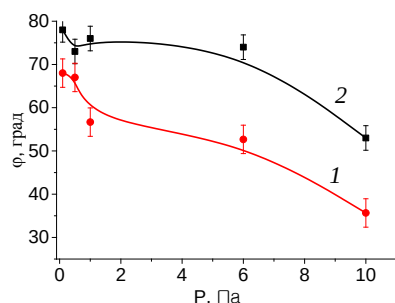


Рис. 4. Зависимость контактного угла смачивания поверхности полипропилена после обработки:
1 – аргон и 2 – воздух

Исходное значение угла смачивания, измеренное непосредственно перед обработкой, находилось в диапазоне (75–85°) [10]. Как видно смачиваемость подложек значительно снизилась лишь при давлениях, превышающих 5 Па для обоих газов. Причем для воздушной среды краевой угол снизился до 35° в отличие от аргона, где снижение значения угла смачиваемости достигло 50°. Отличие в степени влияния плазмы на смачиваемость для аргона и воздуха объясняется различием их механизмов воздействия на поверхность.

Заключение

В результате исследования установлено, что обработка полипропилена в воздушной среде снижает краевой угол смачивания до 35° (против 50° для аргона) благодаря комбинированному физико-химическому воздействию. Метод исключает термическую деградацию материала (нагрев не превышал 80°) и демонстрирует перспективность для управления адгезионными свойствами полимеров без использования агрессивных химических реагентов. Полученные результаты открывают возможности для промышленного применения экологически безопасной плазменной обработки полиолефинов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00358, <https://rscf.ru/project/24-29-00358/>.

Литература

1. Tu G. High-Performance Polyolefin Material: Synthesis, Properties, and Application of Poly (4-Methyl-1-pentene) // International Journal of Molecular Sciences. – 2025. – Vol. 26, No. 2. – P. 600.
2. Feng N. Development of Flexible Electronic Interlayer Material: Advancing by Protein- Based Interfacial Adhesion // Advanced Engineering Materials. – 2025. – P. 2500391.
3. Krieghoff Jan et al. How to sterilize biodegradable polymers? An in-depth characterization of effects of low energy electron beam irradiation (LEEI) and gamma irradiation on the molecular weight of poly (lactide-co-glycolide) films // International Journal of Pharmaceutics. – 2025. – P. 125684.
4. A review of simulation modeling of the state evaluation and process prediction of plasma processing under atmospheric pressure / X. Wei, A. Mitchell, R. Sun, N. Yu, K. Yamamura // Nanomanufacturing and Metrology. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – P. 16.
5. First numerical analysis of runaway electron generation in tungsten-rich plasmas towards ITER / J. Walkowiak, M. Hoppe, I. Ekmark, A. Jardin, J. Bie-lecki, K. Król, M. Scholz // Nuclear Fusion. – 2024. – Vol. 64, No. 3. – P. 036024.
6. In-suit cemented strategy enables intumescent flame retardant transition from hyper-hydrophilic to hydrophobic and aggregation flame retardant effect simultaneously in polypropylene / S. Li, W. Tang, L. Qian, J. Wang, X. Wu, Y. Qiu, W. Xi // Composites Part B: Engineering. – 2024. – Vol. 287. – P. 111874.
7. Kinetic study of Sn target metal plasma plume glow expansion / R. Gong, Q. Chen, Y. Fu, Z. Ding, X. Lu, D. Wu // Vacuum. – 2025. – P. 114609.
8. New perspectives of atmospheric pressure dielectric barrier discharges for the deposition of thin films: From uncontrolled amorphous plasma-polymer layers to chemically patterned and crystalline (in) organic coatings / M. Brabant, A. Demaude, J. Mertens, N. Fosseur, A. Re-my, M.S. Fall, F. Reniers // Surface and Coatings Technology. – 2025. – Vol. 495. – P. 131559.
9. Surface modification of polymers by plasma treatment for appropriate adhesion of coatings / G. Primec, M. Mozetič // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 7. – P. 1494.
10. Effect of SiO₂-H₂O nanofluids on wettability of pulverized coal and the modification mechanism / J. Zhao, S. Tian, Q. Zou, H. Xie, Q. Ran, T. Ma, X. Zhang // Fuel. – 2024. – Vol. 359. – P. 130396.

Климов Александр Сергеевич

Д-р техн. наук, проф. каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Дагри Эброэм Жозель-Эрик

Аспирант каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: joelericdagri@gmail.com

Анна Викторовна Долгова

Аспирант каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: weatheraregood@gmail.com

А.В. Долгова, А.А. Зенин

Влияние параметров электронного пучка на размеры области расплава

Электронно-лучевая наплавка порошковых материалов в форвакуумной области является перспективным методом получения защитных покрытий. В процессе электронно-лучевой наплавки важно контролировать глубину проплава для обеспечения эффективности процесса. Для определения влияния параметров пучка на размеры области расплава проводилось облучение образцов из стали и нержавеющей стали при различных параметрах процесса. Так, увеличение ускоряющего напряжения с 10 до 15 кВ, как и увеличение тока эмиссии с 25 до 35 мА, приводят к увеличению глубины области расплава для стали и нержавеющей стали в 1,5–2 раза. В то же время, ширина области расплава увеличивается в среднем на 50%. Отношение ширина/глубина области расплава уменьшается с увеличением как ускоряющего напряжения, так и тока эмиссии. Наряду с этим наблюдается увеличение микротвердости на проплавленной линии, возрастающее от 0,4 до 2 ГПа с ростом ускоряющего напряжения с 10 до 15 кВ.

Ключевые слова: электронный пучок, наплавка порошков, размеры области расплава, форвакуумный диапазон давлений.

Технология электронно-лучевой наплавки предназначена для упрочнения, восстановления и модификации поверхностей, подвергающихся интенсивным агрессивным воздействиям. В настоящее время исследуются области применения технологии электронно-лучевой наплавки как в условиях вакуума [1], так и при выводе электронного пучка в атмосферу [2]. Тем не менее низкая эффективность использования порошкового материала при использовании традиционных технологий, связанная с зарядкой и разлетом порошка из зоны расплава, требует поиска новых подходов.

Повышение эффективности взаимодействия электронного пучка с порошковым материалом за счёт снижения зарядки порошка [3] в процессе его наплавки может быть достигнуто за счёт перехода в форвакуумную область давлений (3–30 Па). При распространении электронного пучка в указанном диапазоне давлений наблюдается появление плотной пучковой плазмы. Наличие пучковой плазмы в области взаимодействия электронного пучка с порошковым материалом позволяет частично или полностью скомпенсировать избыточный заряд, приносимый электронным пучком.

К преимуществам рассмотренного метода можно отнести повышение адгезии получаемых покрытий за счёт сплавления порошкового материала с металлической основой. Однако при этом важно контролировать глубину проплава для обеспечения эффективности процесса. С одной стороны, необходимо обеспечить проплавление материала на глубину, достаточную для создания прочной связи между металлической основой и порошком. С другой стороны, необходимо исключить глубокое проплавление металлической основы, вызывающее неравномерные глубокие борозды на поверхности обрабатываемых материалов.

Так, целью данной работы является определение влияния параметров электронного пучка на геометрические размеры области расплава для повы-

шения эффективности процесса электронно-лучевой наплавки защитных покрытий.

Материалы и методы

Для определения влияния параметров электронного пучка на размеры области расплава были проведены серии экспериментов по проплавлению линий на металлических дисках толщиной 5 мм и диаметром 20 мм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

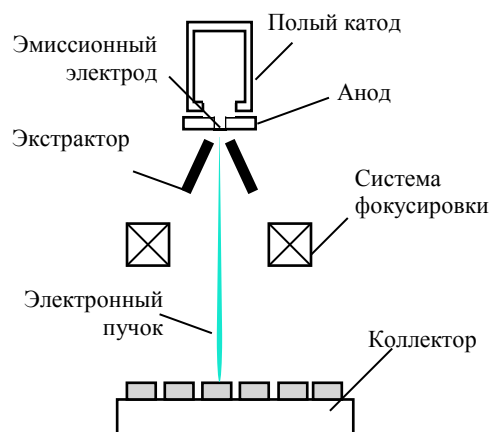


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В качестве источника электронного пучка использовался плазменный источник электронов, функционирующий в форвакуумном диапазоне давлений. Разрядная система такого источника состоит из полого катода, плоского анода и экстрактора. В центре анода находится эмиссионное окно, в котором располагается эмиссионный электрод с одним эмиссионным отверстием диаметром 0,75 мм. Ускоренный электронный пучок фокусируется с помощью электромагнитной системы фокусировки и направляется на коллектор, на котором расположены образцы из различных материалов. Коллектор установлен на системе перемещения, позволяющей перемещать коллектор в двух плоскостях.

Во время облучения неподвижный узкосфокусированный электронный пучок проплавлял поверхность мишени (металлического диска), движущейся с заданной скоростью 55 мм/мин, одиночной линией. Для определения влияния ускоряющего напряжения на размеры области расплава значение ускоряющего напряжения U_a изменялось от 10 до 15 кВ с шагом 1 кВ при фиксированных значениях тока эмиссии I_e , равных 25 и 35 мА. Давление рабочего газа (гелия) в камере p поддерживалось в диапазоне 7–11 Па.

В качестве исследуемых образцов использовались диски из стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. На облученных образцах с помощью микротвердомера ПМТ-3 измерялось значение микротвердости по Виккерсу.

Определение размеров области расплава проводилось путем изучения микроструктуры по толщине облученного образца. Для этого на образце был сделан срез со стороны начала сканирования электронным пучком. Затем срез был отшлифован и отполирован до зеркальной поверхности. Отполированный образец был обезжирен, а затем протравлен в 5% растворе азотной кислоты с этиловым спиртом в течение 3 мин для выявления микроструктуры области расплава.

Результаты и их обсуждение

Визуальный осмотр облученных образцов показал, что увеличение тока эмиссии до 45 мА вызывает сильное неравномерное проплавление стального диска при ускоряющем напряжении больше 11 кВ. В связи с этим в работе рассматриваются только образцы, облученные при значениях тока эмиссии, равных 25 и 35 мА.

На рис. 2 показаны фотография поверхности образца после облучения электронным пучком и фотография среза образца после травления.

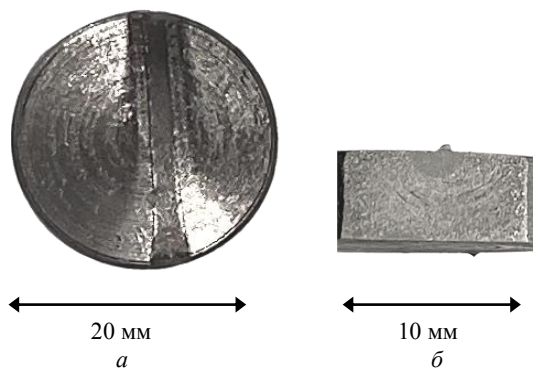


Рис. 2. Фотография образца после облучения – а; фотография среза образца после травления – б

Визуально наблюдается тенденция к увеличению ширины области расплава по мере нагрева образца при его сканировании электронным пучком (рис. 2, а), а также с увеличением тока эмиссии и ускоряющего напряжения для всех изученных материалов. На рис. 3 приведены зависимости ширины и глубины области расплава соответственно, определенных с помощью микроскопа МБС-10.

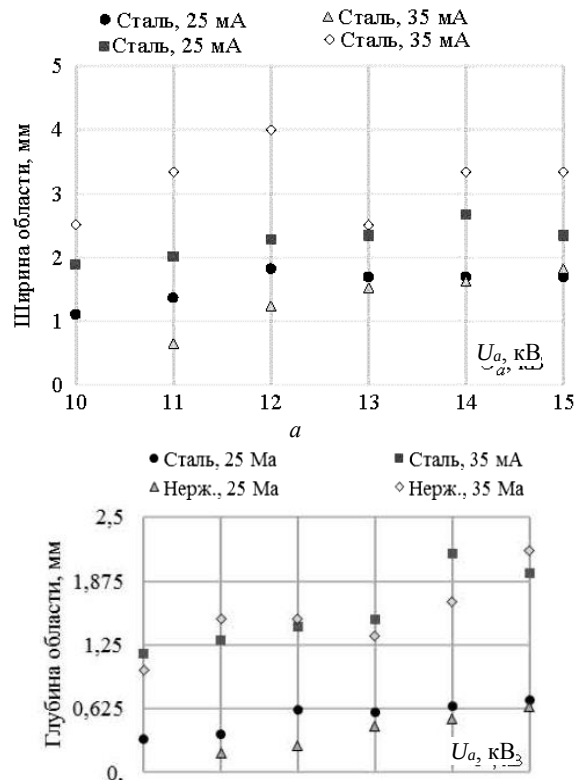


Рис. 3. Зависимость: а – ширины; б – глубины области расплава от ускоряющего напряжения

Ширина области расплава при облучении образцов из нержавеющей стали при токе эмиссии 25 мА увеличивается практически в два раза при увеличении ускоряющего напряжения с 10 до 15 кВ. В то же время для остальных образцов также наблюдается увеличение ширины области расплава на 30–50%.

На рис. 4 показано изменение отношения ширина/глубина области расплава от ускоряющего напряжения.

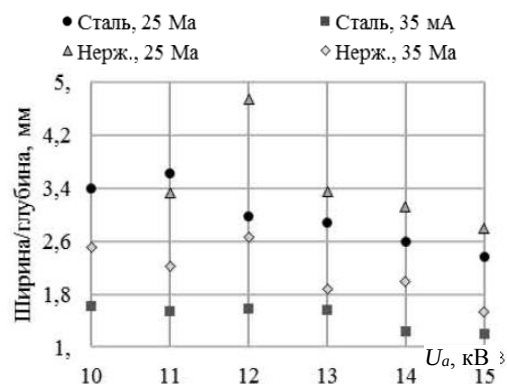


Рис. 4. Зависимость отношения ширина/глубина области расплава от ускоряющего напряжения

Облучение образцов при токе эмиссии 25 мА вызывает увеличение глубины области расплава в 1,5–2 раза при увеличении ускоряющего напряжения с 10 до 15 кВ. Для образцов, облученных при токе эмиссии 35 мА, наблюдается увеличение глубины области расплава на 80–90%.

Из зависимостей видно, что увеличение как ускоряющего напряжения, так и тока эмиссии приводят к увеличению глубины и ширины области расплава для стали и нержавеющей стали. Однако отношение ширина/глубина области расплава уменьшается с увеличением как ускоряющего напряжения, так и тока эмиссии. При этом наибольшее значение этого параметра наблюдается для образцов из нержавеющей стали, облученных при токе эмиссии 25 мА.

Для пяти образцов из стали Ст3, облученных электронным пучком при токе эмиссии 35 мА и ускоряющем напряжении в диапазоне от 10 до 15 кВ было измерено значение микротвердости. Значения микротвердости были измерены на проплавленной линии, вне линии и на обратной (не облученной) стороне образца. Зависимость увеличения значения микротвердости на проплавленной линии от ускоряющего напряжения показана на рис. 5.

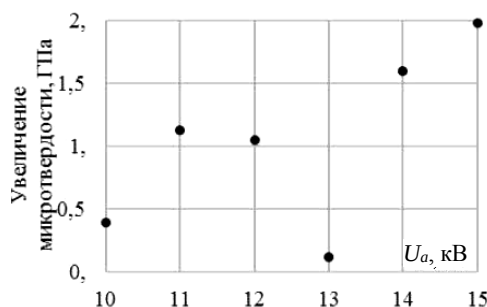


Рис. 5. Зависимость увеличения микротвердости от ускоряющего напряжения для стали Ст3

Среднее значение микротвердости вне проплавленной линии и на обратной стороне образца составило 2,6 ГПа. Увеличение микротвердости на проплавленной линии практически линейно возрастает от 0,4 до 2 ГПа с ростом ускоряющего напряжения от 10 до 15 кВ. Микротвердость, измеренная для образца, облученного при ускоряющем напряжении 13 кВ, выбивается из тенденции, что может быть связано с изначально более высоким значением микротвердости образца.

Заключение

Увеличение ускоряющего напряжения приводит к увеличению глубины и ширины области расплава

для Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т в 1,5–2 раза при облучении электронным пучком с током эмиссии 25 мА. В случае облучения электронным пучком с током эмиссии 35 мА наблюдается увеличение глубины и ширины области расплава вплоть до 90%. В то же время, отношение ширина/глубина области расплава уменьшается с увеличением как ускоряющего напряжения, так и тока эмиссии. Кроме того, наблюдается увеличение микротвердости на проплавленной линии, практически линейно возрастающее от 0,4 до 2 ГПа с ростом ускоряющего напряжения от 10 до 15 кВ.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10037, <https://rscf.ru/project/24-79-10037>.

Литература

1. Воробьев А.С. Оптимизация режима наплавки порошкового припоя ВПР11-40Н электронно-лучевым методом / А.С. Воробьев, В.Н. Батраков, А.Л. Каменева // Современные технологии и реверс-инжиниринг: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023. – С. 172–176.
2. The study of the modes of Ta-Zr powder mixture non-vacuum electron-beam cladding on the surface of the cp-titanium plates / V.V. Samoylenko, E.A. Lozhkina, I.A. Polyakov, O.G. Levintseva, I.S. Ivanchik, O.E. Matts // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 156. – P. 012024.
3. The Mechanism of Current Flow in Composite Alumochromiun Ceramics during Its Electron Beam Sintering in a Forevacuum / A.A. Zenin, I.Y. Bakeev, A.V. Dolgova, A.S. Klimov, E.M. Oks // Tech. Phys. – 2024. – Vol. 69. – P. 1472–1478.

Долгова Анна Викторовна

Аспирант каф. физики
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: annedolgova@yandex.ru

Зенин Алексей Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: zenin1988@gmail.com

А.В. Казаков, Н.А. Панченко, В.Е. Аркатов

Калориметрическая оценка потерь энергии импульсного электронного пучка большого радиуса при транспортировке в форвакуумной области давлений

Представлены калориметрические измерения энергии электронного пучка, генерируемого источником электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда, в зависимости от протяженности области транспортировки при генерации импульсного электронного пучка в атмосфере азота при давлениях от 5 до 11,6 Па и токе эмиссии до 30 А. Протяженность области транспортировки (ПТ) пучка увеличивалась от 160 до 200 мм. Было установлено, что увеличение давления рабочего газа приводит к большим потерям энергии электронного пучка на транспортировку, чем увеличение протяженности области транспортировки.

Ключевые слова: эмиссия электронов, плазменный катод, калориметрические измерения, электронный пучок, форвакуумный диапазон давлений.

В настоящее время широко используются технологии модифицирования поверхности материалов на основе концентрированных потоков энергии, таких как электронные пучки [1, 2]. Для этих целей все чаще используют источники электронов с плазменным катодом. Такие источники электронов позволяют получать пучки электронов, как непрерывные, так и импульсные узкого или широкого сечения [3–6]. Источники электронов с плазменным катодом обычно работают при давлениях от 10^{-4} до 10^{-1} Па [3–6] и осуществляют обработку и модификацию проводящих материалов – металлов и их сплавов. При таких рабочих давлениях на поверхности непроводящих материалов образуется нескомпенсированный отрицательный заряд, который существенно снижает или вовсе препятствует передаче энергии от электронного пучка поверхности обрабатываемого материала. Создание импульсных и непрерывных плазменных источников электронов, работающих при форвакуумных давлениях (1–100 Па), позволяет полностью или частично решить эту проблему [7].

При таких рабочих давлениях при распространении электронного пучка происходит ионизация рабочего газа, за счет чего посредством образованных положительных ионов происходит компенсация отрицательного заряда на поверхности непроводящих материалов [8]. Эта особенность позволяет успешно применять форвакуумные плазменные источники электронов для обработки и модификации поверхности изделий из стекла, керамики, полипропилена и других непроводящих материалов.

Однако при обработке с помощью таких источников электронов необходимо учитывать и другие их особенности, которые могут повлиять на конечный результат. Например, при повышенном рабочем давлении в процессе распространения электронного пучка образуется пучковая плазма, что приводит к образованию ионного потока, который движется в обратную сторону и способен проникнуть в разрядную область и оказать влияние на рабочие параметры источника и параметры эмиссионной плазмы [7]. К другой особенности работы форвакуумных плазменных источников можно отнести возможность

возникновения в разрядном промежутке паразитного высоковольтного тлеющего разряда [7]. Все это также оказывает влияние на потери энергии пучка при его транспортировке.

Цель данной работы – дать оценку калориметрическим методом влияния протяженности области транспортировки и давления газа на потери энергии электронного пучка при его транспортировке.

Экспериментальная установка и методика измерений

Измерения проводились с помощью установки, показанной на рис. 1. Для генерации электронного пучка использовался форвакуумный импульсный источник электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда, характеристики которого описаны в [9]. Под протяженностью области транспортировки принималось расстояние L от ускоряющего электрода до поверхности мишени.

В качестве мишени использовался калориметр. Калориметр крепился к системе перемещений с помощью керамического изолятора. Система перемещения регулировала положение калориметра на расстоянии L от 160 до 200 мм.

Электрические параметры источника электронов контролировались с помощью высоковольтного щупа для ускоряющего напряжения U_a и трансформаторов тока для тока разряда I_d и тока эмиссии I_e . Все измерения проводились в атмосфере азота. С помощью системы напуска и откачки давление p регулировалось в пределах от 5 до 11,6 Па. Импульсный генератор позволял поддерживать частоту следования импульсов пучка 1 Гц при их длительности 600 мкс. Ускоряющее напряжение поддерживалось постоянным $U_a = 8$ кВ.

Для оценки потери энергии пучка был выбран калориметрический метод. Калориметр представлял собой медную пластину диаметром 145 мм, толщиной 2,85 мм и массой $m = 0,411$ кг. На круглой медной пластине с шагом 3 см располагались 3 NTC терморезистора марки B57703-M 103-G40 с номинальным сопротивлением 10 кОм. Последовательно с терморезисторами были подсоединены измерительные резисторы марки МЛТ-1 с сопротивлениями, близкими к 10 кОм.

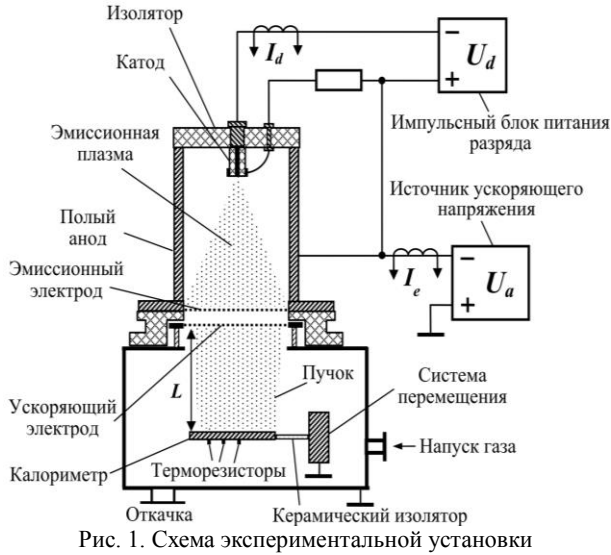


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На измерительную цепь, представленную на рис. 2, подавалось постоянное напряжение $U_{вх} = 5,5$ В. Выходное напряжение $U_{вых}$ с измерительного резистора регистрировалось с помощью осциллографа марки Tektronix TDS 2024.

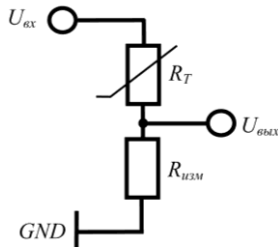


Рис. 2. Принципиальная схема подключения терморезистора

Результаты эксперимента и их анализ

Расчет величины сопротивления терморезистора в процессе нагрева/остывания производился с помощью выражения

$$R_T = \frac{(U_{вх} - U_{вых})R_{изм}}{U_{вых}}, \quad (1)$$

где R_T – значение сопротивления терморезистора при температуре T , $R_{изм}$ – сопротивление измерительного сопротивления, $U_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – выходное напряжение.

Расчет величины температуры терморезистора в процессе нагрева/остывания оценивался как

$$T = \frac{1}{\frac{\ln(R_T) - \ln(R_{25})}{B} + \frac{1}{T_{25}}}, \quad (2)$$

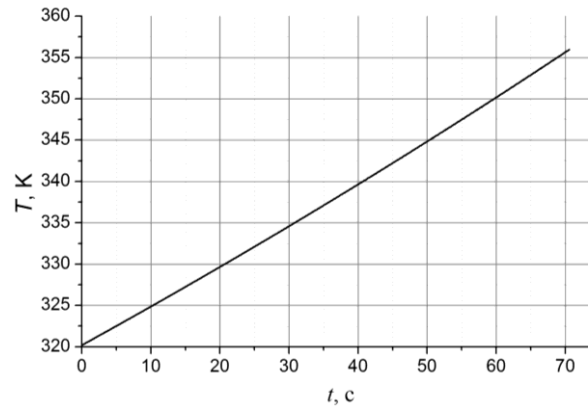
где T – текущая температура терморезистора в кельвинах, R_T – значение сопротивления терморезистора при температуре T , R_{25} – значение сопротивления терморезистора при комнатной температуре $T = 25$ °C, T_{25} – температура, соответствующая $T = 25$ °C, подставляемая в кельвинах ($T_{25} = 298,15$ K).

Для дальнейших расчетов полученная зависимость температуры от времени $T(t)$ аппроксимировалась функцией Стирлинга

$$T(t) = a + \frac{b(e^{kt} - 1)}{k}, \quad (3)$$

где a, b, k – коэффициенты функции Стирлинга.

Функция Стирлинга была выбрана для аппроксимации, так как лучше описывала экспериментальные результаты, чем линейная зависимость. Результат аппроксимации нагрева калориметра при давлении $p = 11,6$ Па и $L = 175$ мм от начальной температуры 320 К представлен на рис. 3.

Рис. 3. Аппроксимация функцией Стирлинга зависимости температуры калориметра в процессе нагрева электронным пучком от времени при давлении $p = 11,6$ Па и $L = 175$ мм

Полученные таким образом зависимости температуры от времени использовались для дальнейшего расчета потери энергии электронного пучка на транспортировку.

Для оценки потери энергии электронного пучка на транспортировку использовалось уравнение теплового баланса. Учитывалось 4 источника получения и потери теплоты калориметром: теплота, получаемая от импульсного электронного пучка; теплота, получаемая от стенок камеры; теплота, получаемая от паразитного ВТР; потеря энергии на тепловое излучение (закон Стефана–Больцмана) и тепловая энергия медной пластины после облучения.

$$Q_b - Q_{сб} + Q_{ст} + Q_{втр} - Q_M = 0, \quad (4)$$

где Q_b – энергия, полученная калориметром от электронного пучка, $Q_{сб}$ – энергия, теряемая на тепловое излучение, $Q_{ст}$ – энергия, полученная от теплового излучения стенок камеры, $Q_{втр}$ – теплота, полученная от паразитного ВТР, Q_M – тепловая энергия мишени после облучения.

Энергию, теряемую на тепловое излучение, согласно закону Стефана–Больцмана можно оценить как

$$Q_{сб} = \alpha \sigma S \int_{t_1}^{t_2} T(t)^4 dt, \quad (5)$$

где α – коэффициент серости поверхности калориметра, σ – постоянная Стефана–Больцмана, S – площадь поверхности калориметра, $T(t)$ – зависимость температуры поверхности калориметра от времени, t_1 – время начала процесса нагрева/остывания, t_2 – время окончания процесса нагрева/остывания.

Зависимость $T(t)$ аппроксимировалась функцией Стирлинга, поэтому для расчета $T(t)$ ⁴ использовалась функция Симпсона.

Коэффициент серости и энергия, полученная от теплового излучения стенок камеры, оценивались экспериментально в процессе охлаждения калориметра внутри вакуумной камеры и составили $\alpha \sim 0,5$ и $Q_{ст} = P_{ст} t$, где $P_{ст} = 7,56$ Вт.

Теплоту, полученную от паразитного ВТР, можно рассчитать через мощность ВТР $P_{ВТР}$:

$$Q_{ВТР} = P_{ВТР} t. \quad (6)$$

Мощность ВТР оценивалась в каждом эксперименте в процессе нагрева калориметра только за счет ВТР.

Тепловая энергия мишени оценивалась по формуле

$$Q_M = cm\Delta T, \quad (7)$$

где c – удельная теплоемкость меди, m – масса медной пластины калориметра, ΔT – разница температуры калориметра до и после нагрева пучком.

Тогда с учетом (5)–(7) энергию Q_b , полученную калориметром от электронного пучка, можно оценить как

$$Q_b = Q_M + Q_{СБ} - Q_{ст} - Q_{ВТР}. \quad (8)$$

Для оценки потери энергии при транспортировке электронного пучка был введен коэффициент η , равный отношению энергии Q_b , полученной калориметром, к суммарной энергии пучка на выходе эмиссионного электрода, эмитированной за время t :

$$\eta = \frac{Q_b}{Q_e}, \quad (9)$$

где Q_e – суммарная энергия пучка на выходе эмиссионного электрода.

Суммарную энергию электронного пучка на выходе эмиссионного электрода Q_e можно оценить как

$$Q_e = U_a I_e N t_p, \quad (10)$$

где I_e – ток эмиссии, N – количество импульсов пучка за время t , t_p – длительность импульсов.

Выражение (9) использовалось для расчета коэффициента передачи энергии пучка η в экспериментах. Полученная зависимость η от давления азота при фиксированной длине транспортировки $L = 175$ мм показана на рис. 4. Увеличение давления рабочего газа от 5 до 11,6 Па приводит к уменьшению коэффициента передачи энергии пучка на ~21%. Такое значительное уменьшение может быть объяснено тем, что с ростом давления уменьшается длина свободного пробега электронов, увеличивается вероятность рассеивания электронов, а также энергия электронов расходуется на ионизацию рабочего газа. Расфокусировка пучка также может оказывать влияние, но этот процесс на протяженности 20 мм мал [10].

Зависимость коэффициента передачи энергии пучка η от протяженности транспортировки L при фиксированном давлении азота $p = 8$ Па показана на рис. 5. С ростом протяженности от 160 до 200 мм

также наблюдается уменьшение коэффициента передачи энергии пучка, при этом спад не превышает 2,5%.

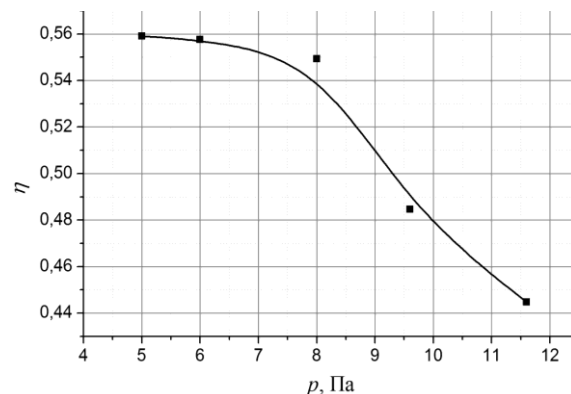


Рис. 4. График зависимости коэффициента передачи энергии электронного пучка η от давления p рабочего газа азота при протяженности транспортировки $L = 175$ мм

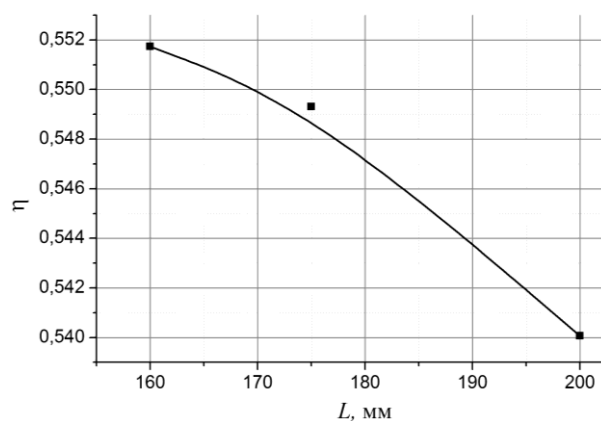


Рис. 5. График зависимости η от протяженности транспортировки L при давлении рабочего газа $p = 8$ Па

Заключение

В ходе выполнения работы калориметрическим методом были оценены потери импульсного электронного пучка, генерируемого в форвакууме. С увеличением давления газа с 5 до 11,6 Па потери возрастают на ~21% и составили около 55,5%. Увеличение протяженности области транспортировки с 160 до 200 мм приводит к увеличению потери энергии на ~2,5%.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № FEWM-2023-0012.

Литература

1. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment / R. Fetzer, G. Mueller, W. An, A. Weisenburger // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 258. – P. 549–556.
2. Proskurovsky D.I. et al. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1998. – Vol. 16 (4). – P. 2480–2488.
3. Pulsed plasma electron sources / Y.E. Krasik, D. Yarmolich, J.Z. Gleizer, V. Vekselman, Y. Hadas, V.T. Gurovich, J. Felsteiner // Physics of Plasmas. – 2009. – Vol. 16(5). – Art. No. 057103.

4. Kiziridi P.P. Production of low-energy, high-current electron beams in a gun with a controlled explosive emission cathode / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur // Vacuum. – 2021. – Vol. 194. – Art. No. 110560.

5. Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьев, С.А. Гамермаистер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 12. – С. 12–30.

6. Девятков В.Н. Плазменный сеточный катод на основе контрагированного дугового разряда низкого давления в неоднородном магнитном поле / В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 10-2. – С. 32–38.

7. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.

8. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V.A. Burdovitsin, A.S. Klimov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Plasma Sources Science and Technology. – 2010. – Vol. 19, No. 5. – Art. No. 055003.

9. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide

pulse-width range / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Vol. 91 (9). – Art. No. 093304.

10. Production and application of low-energy, high-current electron beams / G.E. Ozur, D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, A.B. Markov // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21 (2). – P. 157–174.

Казakov Андрей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. физики
Томского государственного ун-та
систем управления и радиозлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: andrei.v.kazakov@tusur.ru

Панченко Николай Алексеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: nikolai.a.panchenko@tusur.ru

Аркатов Валерий Евгеньевич

Аспирант. каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: valerii.e.arkatov@tusur.ru

Т.О. Климин, А.С. Климов, С.А. Ендурев

О влиянии давления газа на нагрев непроводящих и проводящих материалов при их электронно-лучевой обработке

С использованием электронного источника с плазменным катодом осуществлен нагрев металлических и керамических мишеней в диапазоне давлений 0,1–10 Па. Получены зависимости температуры от длительности облучения заземленной медной, изолированной медной и керамической мишени. Экспериментально установлено, что эффективность нагрева сильно зависит от давления и электропроводности мишени. Для заземленного металла наилучший нагрев наблюдается при низком давлении (0,1 Па), в то время как для изолированной металлической и керамической мишеней максимальная температура достигается при более высоком давлении (10 Па). Показано, что теплопроводность материала также существенно влияет на установившуюся температуру.

Ключевые слова: электронно-лучевая обработка, керамика YSZ, керамика Al_2O_3 , зарядка диэлектрика, форвакуум.

Технологии обработки материалов с использованием концентрированных потоков энергии, таких как лазерная и электронно-лучевая, находят широкое применение в промышленности для сварки, резки, плавки и модификации поверхности [1]. Лазерное излучение, обладая высокой точностью и возможностью гибкой передачи по оптическим системам, является широко распространенным инструментом. Однако при обработке многих материалов, особенно керамик, лазерный метод сталкивается с фундаментальными ограничениями. Ключевым недостатком является низкий коэффициент поглощения лазерного излучения многими диэлектриками в инфракрасном и видимом диапазонах, что требует применения мощных и дорогостоящих лазерных систем [2]. Кроме того, процесс часто сопровождается образованием трещин из-за высоких градиентов температуры и возникновением плазменного факела над зоной воздействия, который экранирует и дестабилизирует излучение [3].

Электронно-лучевая обработка обладает высоким коэффициентом поглощения энергии электронов материалом (до 90% и более) [4], что обеспечивает эффективную передачу энергии вне зависимости от оптических свойств и агрегатного состояния материала, а возможность работы в вакууме предотвращает окисление и загрязнение материала. Трудности возникают при обработке непроводящих материалов (керамика, стекла, полимеры и т.д.). В условиях высокого вакуума диэлектрическая мишень не может отвести вносимый электронным пучком заряд, что приводит к зарядке поверхности [5], дефокусировке либо отклонению электронного пучка и нестабильности процесса.

Перспективным решением проблемы зарядки является проведение электронно-лучевого воздействия в форвакуумной области давлений (примерно 1–100 Па). В этом режиме электронный пучок, ионизируя молекулы остаточного газа, создает низкотемпературную плазму. Возникающие в плазме положительные ионы под действием поля заряженной поверхности устремляются к ней, обеспечивая частичную компенсацию отрицательного заряда. Хотя данный метод демонстрирует свою эффектив-

ность для стабилизации процесса, его влияние на поглощаемую мощность и соответствующий нагрев материала зависит от давления в вакуумной камере и типа самого материала.

Данная работа посвящена измерению скорости нагрева металлических и диэлектрических (керамика) мишеней при воздействии на них электронного пучка в зависимости от давления в вакуумной камере.

Методика и техника эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 1.

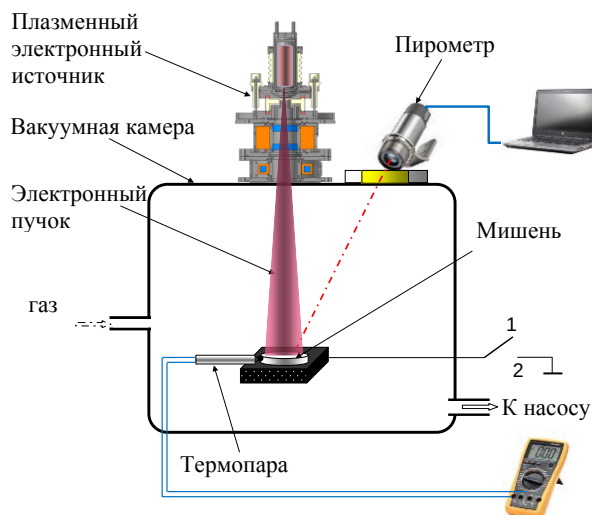


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для генерации электронного пучка использовали форвакуумный плазменный источник электронов. Источник работал с напуском газа в катод, что позволяло обеспечить его работоспособность при изменении давления в вакуумной камере от 0,1 до 10 Па [6]. Вакуумная камера объемом 64 л откачивалась до давления 10 Па форвакуумным механическим насосом BocEdwards 40, для достижения вакуума уровня 0,1 и 1 Па использовался диффузионный насос. В качестве рабочего газа использовался воздух. Металлическая мишень представляла собой цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10 мм и была изготовлена из меди. В качестве диэлектрических мишеней использовали керамику на основе оксида алюминия

(Al_2O_3) и диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ). Керамические мишени представляли собой диски диаметром 10 мм и толщиной 3 мм.

Электронный пучок с мощностью 50 Вт (ток пучка 10 мА, ускоряющее напряжение 5 кВ) направлялся на мишени. Диаметр электронного пучка устанавливался равным диаметру мишени. Для измерения температуры использовали инфракрасный пирометр RAYTEK с диапазоном измерения температуры 20–800 °С. Калибровка пирометра осуществлялась с помощью хромель-копелевой термопары.

Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены зависимости температуры медной мишени от длительности нагрева для случая заземленной (ключ на рис. 1 в положении 2) и изолированной мишени (ключ на рис. 1 в положении 1).

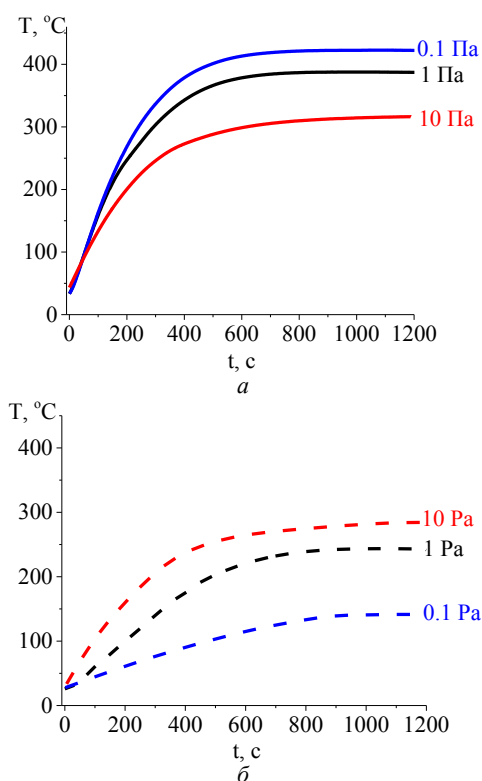


Рис. 2. Зависимости температуры медной мишени от длительности нагрева и при различном давлении газа в вакуумной камере: заземленной – а и изолированной – б

Из рис. 2 видно, что в случае заземленной мишени с понижением давления газа возрастает как установившееся значение температуры, так и скорость ее роста. Установившееся значение при заданной мощности электронного пучка достигает максимального значения 420 °С при давлении 0,1 Па. Снижение давления в области транспортировки пучка приводит к сокращению частоты столкновений электронов с атомами рабочего газа. Длина свободного пробега электронов здесь максимальна и составляет несколько десятков метров, т.е. при протяженности транспортировки 40 см электроны двигаются до мишени без столкновений и рассеяния. С

ростом давления возрастает частота упругих столкновений электронов с атомами газа, а длина их свободного пробега становится сопоставимой с протяженностью транспортировки, что приводит к рассеянию электронного пучка. В результате этого и ввиду малого диаметра мишени часть электронов её не достигает, что снижает как скорость нагрева, так и установившуюся температуру.

В случае изолированной металлической мишени ситуация кардинально меняется. Наибольшее установившееся значение температуры формируется для давления 10 Па и снижается с понижением давления газа. Такое отличие от случая заземленной мишени может быть объяснено, если учесть механизм компенсации зарядки мишени ионами из пучковой плазмы [7].

При давлении 0,1 Па очевидно, концентрация пучковой плазмы ничтожно мала и ионов недостаточно для компенсации заряда мишени. Энергия электронов пучка, достигающих мишень, снижена за счет необходимости преодоления сил отталкивания со стороны электростатического поля отрицательно заряженной мишени. В случае роста давления концентрация пучковой плазмы возрастает и, соответственно, увеличивается количество ионов из нее, которые компенсируют заряд электронного пучка. Очевидно, в таком случае повышение рассеяния электронов пучка на атомах рабочего газа не так сильно влияет по сравнению с ростом энергии электронов пучка, дошедших до мишени.

Низкая электропроводность мишени из керамики приводит к накоплению заряда пучка на ее поверхности и в этом смысле ее нагрев будет похожим на нагрев металлической изолированной мишени. На рис. 3 представлены зависимости температуры мишени от длительности нагрева для образцов, выполненных из керамики на основе диоксида циркония YSZ и оксида алюминия Al_2O_3 при давлении 0,1 и 10 Па.

В отличие от металлической мишени температура керамики несколько ниже для всех значений давлений. При давлении газа в вакуумной камере 0,1 Па зарядка керамики YSZ значительная, и установившаяся температура на поверхности не достигает и 150 °С. Более низкое значение температуры на поверхности керамики из оксида алюминия может быть связано с различием в коэффициентах теплопроводности. Для Al_2O_3 коэффициент теплопроводности составляет 20–30 Вт/(м·К), для YSZ – менее 3 Вт/(м·К).

С ростом давления температура на поверхности обеих керамики возрастает, однако для диоксида циркония остается все же выше.

Закключение

Проведенное исследование показало, что эффективность нагрева материалов форвакуумным электронным пучком зависит от давления газа в вакуумной камере и электропроводности мишени. Для заземленного металла максимальный нагрев достигается при низком давлении (0,1 Па) за счет низкого

рассеяния электронов пучка. В отличие от этого для диэлектрических и изолированных металлических мишеней оптимальным является более высокое давление (10 Па), так как образующаяся плазма компенсирует поверхностный заряд, позволяя электронам эффективно передавать энергию.

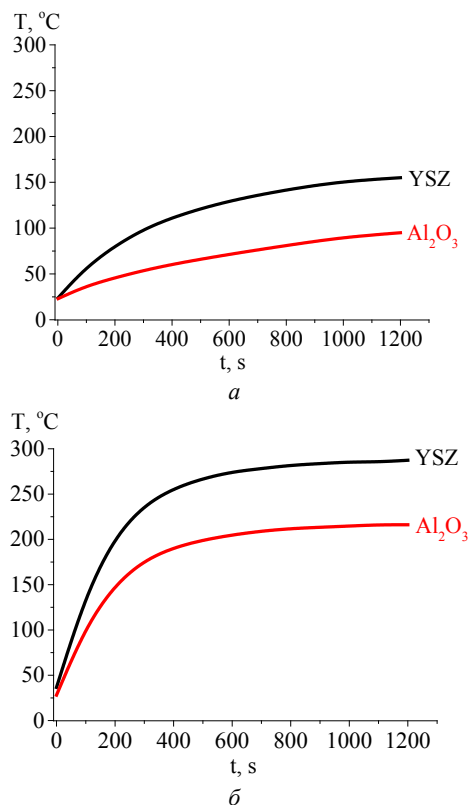


Рис. 3. Зависимости температуры мишени из диоксида циркония YSZ и оксида алюминия Al_2O_3 от длительности нагрева и для давлений газа в вакуумной камере: 0,1 Па – а; 10 Па – б

Таким образом, для обработки непроводящих материалов необходимо выбирать режим, обеспечивающий достаточную компенсацию заряда.

Литература

1. Модификация поверхности полимерных материалов импульсным электронным пучком / А.В. Казаков, А.С. Климов, А.С. Смаилов, А.В. Медовник, Ю.Г. Юшков, И.Ю. Бакеев // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 4 (30). – С. 75–78.
2. Григорьянц А.Г. Особенности взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками / А.Г. Григорьянц, М.А. Богданова // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2012. – № ФС 77.
3. Колдунов М.Ф. Теоретический анализ эффекта накопления в лазерном разрушении прозрачных диэлектриков при многократном облучении / М.Ф. Колдунов, А.А. Маненков, И.Л. Покотило // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 25:7. – С. 674–678.
4. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum / Burdovitsin V.A. et al. // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 358. – P. 726–731.
5. Зыков В.М. Комбинированная модель зарядки поверхности и объёма диэлектрической мишени электронами с энергией 10–30 кэВ / В.М. Зыков, Д.А. Нейман // Успехи физ. наук. – 2018. – Т. 60, № 6. – С. 2201–2208.
6. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.
7. Flatabo R. A systematic investigation of the charging effect in scanning electron microscopy for metal nanostructures on insulating substrates / R. Flatabo, A. Coste, M.M. Greve // J. Microsc. – 2017. – Vol. 265. – P. 287–297.

Климкин Тимур Олегович

Аспирант каф. физики
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: klimkin.timur13@mail.ru

Климов Александр Сергеевич

Проф. каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Ендурев Сергей Алексеевич

Техник лаб. плазменной электроники,
каф. физики ТУСУРа
Эл. почта: sergei.a.enduraev@tusur.ru

В.Е. Аркатов, А.В. Казаков, Н.А. Панченко

Исследование эмиссии электронов в форвакуумном импульсном плазменном источнике электронов с разрядной системой на основе планарного магнетрона

Представлены исследования эффективности эмиссии электронов (отношение тока эмиссии к току разряда) в импульсном источнике электронов, в котором используется разрядная система на основе планарного магнетронного разряда (ПМР), при давлениях от 4 до 16 Па (азот). Сопротивление между полым и плоским анодами принимало два значения: 0 и 5 Ом. Для данных сопротивлений установлено, что эффективность эмиссии растёт с увеличением этого сопротивления. В форвакуумном источнике электронов на основе ПМР увеличение давления газа приводит к росту эффективности эмиссии электронов, что характерно для форвакуумных плазменных источников электронов. Однако в исследованном источнике при токе разряда менее 7–8 А наблюдается заметное снижение эффективности эмиссии электронов при обеих величинах сопротивления между полым и плоским анодами.

Ключевые слова: плазменный источник электронов, эмиссия электронов, эффективность эмиссии электронов, форвакуумный диапазон давлений.

В области повышенных давлений газа 1–100 Па [1–4] эффективная генерация непрерывных и импульсных электронных пучков может обеспечиваться с помощью форвакуумных плазменных источников электронов (ФПИЭ). Электронные пучки, генерируемые ФПИЭ при таких давлениях, обуславливают преимущество, заключающееся в «подавлении» отрицательного заряда, приносимого на поверхность диэлектрика электронным пучком [5]. Физический механизм этого явления заключается в формировании плотной пучковой плазмы, которая обеспечивает нейтрализацию поверхностного отрицательного заряда мишени [6].

Генерация импульсного электронного пучка способствует повышению пиковой мощности, а также обеспечивает возможность управления тепловложением по времени [7], что поспособствовало развитию технологии обработки материалов импульсными электронными пучками для модификации приповерхностного слоя материала с целью улучшения его эксплуатационных характеристик и придания необходимых качеств его поверхности. Исследования, описанные в [8], показали высокую эффективность импульсной электронно-лучевой обработки материалов.

Использование магнетронного разряда для создания эмиссионной плазмы позволяет увеличить плотность тока разряда и как следствие увеличить плотность тока электронного пучка по сравнению с использованием тлеющего и отражательного разрядов [9, 10]. Хотя данная проблема традиционно решается с помощью использования дугового разряда с катодными пятнами, исследования показали, что использование дугового разряда приводит к неравномерности распределения параметров (плотности тока и др.) электронного пучка, как следствие, происходит неравномерный нагрев приповерхностного слоя мишени.

В нашем случае особенно важно, что в форвакуумном плазменном источнике электронов (ФПИЭ)

на основе данного дугового разряда неравномерно распределён ток по сечению электронного пучка большого радиуса [11]. В связи с этим для улучшения однородности пучка в источниках с дуговым разрядом необходимо применение дополнительных методик [12], которые также необходимы и в форвакуумных источниках электронов на основе данного разряда. В качестве альтернативы, лишённой этого недостатка, для формирования плазмы, из которой эмитируются электроны, может использоваться планарный магнетронный разряд (ПМР). В работе [13] были изучены процессы, связанные с иницированием и горением магнетронного разряда в импульсном источнике электронов, использующем разрядную систему на основе планарного магнетрона в условиях форвакуума. Показано, что данный источник электронов обеспечивает достаточно равномерное распределение плотности тока пучка [13].

Целью работы являлось исследование эмиссии электронов в импульсном источнике электронов, использующем разрядную систему на основе ПМР в условиях форвакуума.

Схема экспериментальной установки

На рис. 1 изображены упрощенная схема форвакуумного импульсного источника электронов, в котором используется разрядная система на основе ПМР, а также схема эксперимента. Конструкция разрядной системы и ускоряющего промежутка подробно описана в [13]. В данном исследовании между полым и плоским анодами было подключено сопротивление R_a , которое принимало два значения: 0 и 5 Ом. Вблизи катода обеспечивалась максимальная индукция магнитного поля, равная 155 мТл. С помощью импульсного блока питания разряда, подключенного, как показано на рис. 1, обеспечивались прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой U_{a0} до 1 кВ с частотой следования импульса, равной 0,5 Гц, длительностью, равной 1,3 мс, которые прикладывались к разрядной системе ПМР для иницирования и поддержания горения ПМР.

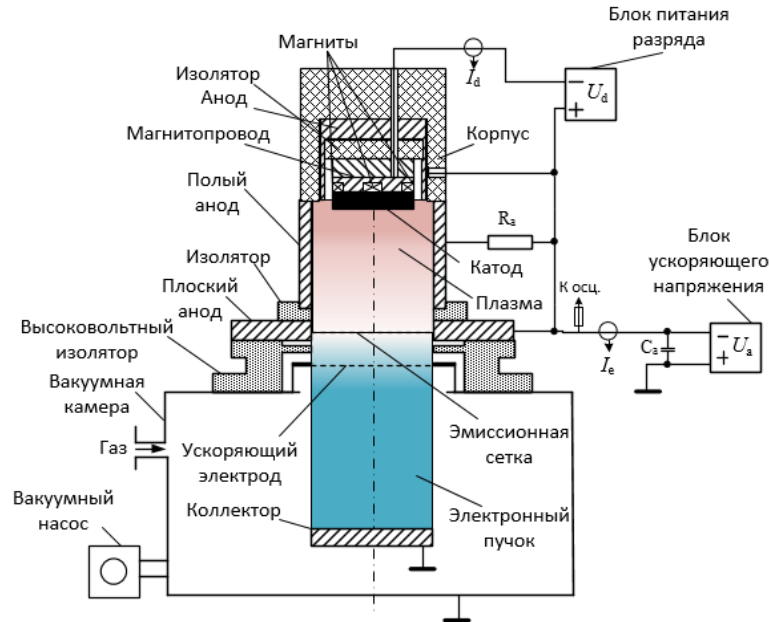


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В импульсном форвакуумном плазменном источнике электронов с разрядной системой на основе планарного магнетрона типичные осциллограммы тока разряда I_d , тока эмиссии I_e и напряжения U_a на ускоряющем промежутке представлены на рис. 2.

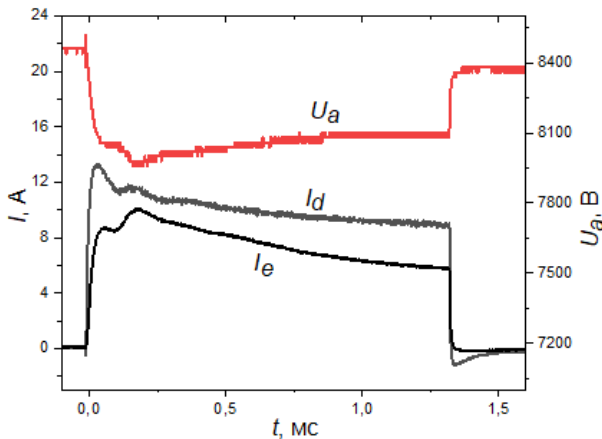


Рис. 2. Типичные осциллограммы тока разряда I_d , тока эмиссии I_e и напряжение U_a на ускоряющем промежутке, давление газа азота $p = 8$ Па

Ускоряющее напряжение $U_a = 8$ кВ было постоянным; оно обеспечивалось высоковольтным источником напряжения, а его контроль осуществлялся высоковольтным пробником напряжения. Ток разряда I_d и ток эмиссии I_e измерялись токовыми трансформаторами. Давление p газа (азот) в вакуумной камере варьировало от 4 до 16 Па.

Результаты и их анализ

На рис. 3 изображен график зависимости эффективности эмиссии электронов I_e/I_d , определяемой как отношение тока эмиссии к току разряда, от давления p газа. Эффективность I_e/I_d существенно увеличивается при росте p от 4 до 16 Па даже при $R_a = 0$ Ом, что аналогично зависимостям I_e/I_d от p

для ФПИЭ с дуговым разрядом, используемым в качестве источника плазмы [14]. Наблюдаемое увеличение I_e/I_d можно объяснить с привлечением модели, изложенной в [14]: рост I_e/I_d происходит вследствие увеличения положительного потенциала плазмы ПМР и роста тока ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода. Это обусловливается наблюдаемым с ростом p увеличением количества ионов, поступающих из пучковой плазмы (ПП), образующейся при ионизации газа (в нашем случае азота) электронным пучком. Ионы из пучковой плазмы ускоряются напряжением U_a и бомбардируют непрозрачные части сетчатого эмиссионного электрода, а также проникают через этот электрод в разрядную плазму, увеличивая её положительный потенциал. Следствием последнего является увеличение ширины потенциального барьера между разрядной плазмой ПМР и анодом, как следует из формулы [15]

$$l_a = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{n_e} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{2}{e \cdot k \cdot T_e} \right)^{0,25} \cdot (\phi_p - \phi_a)^{0,75},$$

где l_a – ширина потенциального барьера между плазмой и анодом; n_e – концентрация электронов в пограничном слое; ϵ_0 – электрическая постоянная; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T_e – температура электронов; ϕ_p и ϕ_a – потенциалы плазмы и анода соответственно. При приложенном U_a рост ϕ_p приводит к «переключению» электронного тока с анода в эмиссию.

На рис. 4 представлены зависимости эффективности эмиссии электронов I_e/I_d от тока разряда I_d при сопротивлениях между полым и плоским анодами $R_a = 5$ Ом (1) и $R_a = 0$ Ом (2). Эффективность эмиссии электронов I_e/I_d при увеличении сопротивления между полым и плоским анодом R_a увеличивается по причине увеличения ширины потенциального барьера у полого анода для электронов.

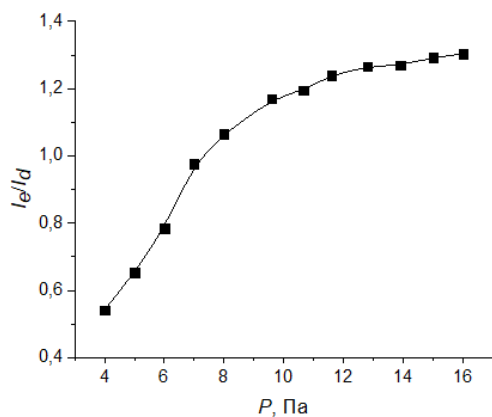


Рис. 3. Эффективность эмиссии I_e/I_d как функция давления p , $R_a = 0$ Ом

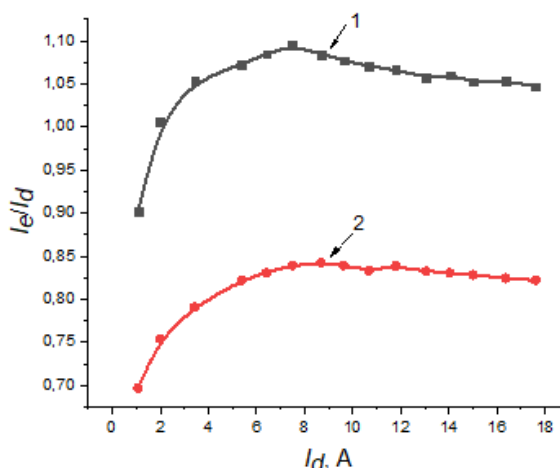


Рис. 4. Эффективность эмиссии I_e/I_d как функция тока разряда I_d , $p = 8$ Па: 1 – $R_a = 5$ Ом, 2 – $R_a = 0$ Ом

В исследованном ФПИЭ на основе ПМР зависимости эффективности I_e/I_d от давления p , тока разряда I_d и сопротивления R_a между полым и плоским анодами имеют схожий характер с ФПИЭ на основе дугового разряда [14]. Однако в рассматриваемом случае использования ПМР для создания эмиссионной плазмы при токах разряда $I_d < 8$ А эффективность эмиссии электронов I_e/I_d увеличивается с ростом I_d , а при токах разряда $I_d > 8$ А наблюдается спад I_e/I_d с ростом I_d , в то время как в [14] наблюдался только монотонный спад I_e/I_d во всем диапазоне токов. При этом в ФПИЭ на основе дугового разряда с катодными пятнами [14] эффективность эмиссии электронов I_e/I_d при $I_d < 8$ А была выше, чем в ФПИЭ с использованием ПМР при тех же условиях. Стоит отметить, что подобные зависимости эффективности эмиссии I_e/I_d от p и анодного сопротивления характерны и для плазменных источников электронов с рабочим давлением 10^{-3} – 10^{-1} Па [16], но плотность ПП при этом существенно ниже, поэтому и рост I_e/I_d менее существенный (при прочих одинаковых условиях, например, прозрачности сеточного эмиссионного электрода). Также стоит отметить, что в работе [16] эффективность эмиссии электронов I_e/I_d практически не изменяется с ростом тока разря-

да для плазменных источников электронов с рабочим давлением 10^{-3} – 10^{-1} Па.

Заключение

Проведены исследования влияния давления газа, тока разряда ПМР и сопротивления между полым и плоским анодами на эффективность эмиссии электронов в импульсном форвакуумном плазменном источнике электронов с разрядной системой на основе ПМР. Показано, что увеличение давления газа и использование сопротивления между полым и плоским анодами увеличивает эффективность эмиссии электронов, что характерно для форвакуумных источников. В то же время в импульсном источнике электронов, в котором используется разрядная система на основе ПМР, при токе разряда менее 8 А может наблюдаться меньшая эффективность эмиссии электронов, чего не наблюдалось, например, в форвакуумном источнике электронов на основе дугового разряда с катодными пятнами [14] и в источнике электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда, генерирующего электронные пучки большого сечения в импульсно-периодическом режиме при более низких давлениях газа [16].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00142, <https://rscf.ru/en/project/25-29-00142/>.

Литература

1. Burdovitsin V.A. Plasma electron sources for electron beam generation in the forevacuum pressure range / V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Laser and Particle Beams*. – 2008. – Vol. 26, No. 4. – P. 619–635.
2. Бурдовицин В.А. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *Приборы и техника эксперимента*. – 2003. – № 2. – С. 127–129.
3. Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников / В.А. Бурдовицин, И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, Д.Б. Золотухин, А.В. Казаков, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, А.В. Тюньков // *Доклады ТУСУРа*. – 2016 – Т. 19, № 2. – С. 5–10.
4. Бурдовицин В.А. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // *Письма в ЖТФ*. – 2009. – Т. 35, № 11. – С. 61–67.
5. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V.A. Burdovitsin, A.S. Klimov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2010. – Vol. 19, No. 5. – Art. No. 055003.
6. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машиностроение, 1951. – 296 с.
7. Электронно-пучковая модификация стали и твердых сплавов / С.В. Григорьев, Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов и др. // *Труды II Междунар. Крейнделевского семинара*. – Улан-Удэ, 2006. – С. 113–120.
8. Свойства и структурное состояние поверхностного слоя циркониевого сплава, модифицированного импульсным электронным пучком и насыщенного водородом / И.П. Чернов, С.В. Иванова, М.Х. Кренинг и др. // *Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 82, № 3. – С. 81–87.

9. Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами / А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 12. – С. 98–101.

10. Семенов А.П. Некоторые свойства магнетронного разряда с полым катодом как генератора плазмы, эмитирующей заряженные частицы / А.П. Семенов, И.А. Семенова // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, № 4. – С. 48–52.

11. Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов на основе дугового разряда / А.В. Казаков, В.А. Бурдовичин, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 6. – С. 50–53.

12. Control of the electron beam density distribution on the collector in sources with a grid plasma cathode based on a low-pressure arc / T.V. Koval, V.I. Shin, M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.N. Devyatkov, N.N. Koval // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No. 2. – P. 310–317.

13. Operational features of a wide-aperture forevacuum-pressure plasma-cathode pulsed electron beam source based on a planar magnetron (sputtering) discharge / A.V. Kazakov, V.E. Arkatov, Yu.A. Burachevsky, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Vacuum. – 2025. – Vol. 245. – Art. No. 114470.

14. Emission characteristics of a forevacuum plasma-cathode source of wide-aperture pulsed electron beam with

layer (mesh) stabilization of emission plasma / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Vacuum. – 2025. – Vol. 227. – Art. No 113428.

15. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

16. Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.С. Воробьев. – Томск, 2015. – 22 с.

Аркатов Валерий Евгеньевич

Аспирант каф. физики ТУСУРа

Эл. почта: valerii.e.arkatov@tusur.ru

Казаков Андрей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа

Эл. почта: andrei.v.kazakov@tusur.ru

Панченко Николай Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент, с.н.с. каф. физики ТУСУРа

Эл. почта: nikolai.a.panchenko@tusur.ru

С.В. Гавриш, А.О. Потапенко, П.А. Чиликина

Алгоритм расчета толщины стенки разрядной оболочки импульсной ксеноновой лампы

Приводится алгоритм расчета толщины стенки разрядных кварцевой и сапфировой оболочек, основанный на зависимостях напряжений, возникающих в толще колбы под воздействием ударных волн, давления рабочего газа (ксенона), потока тепла из плазмы. Для выбора оптимальной толщины стенки приведены результаты исследований тепловых полей короткодуговой ксеноновой лампы и температурной зависимости прочности сапфировой трубы с различной кристаллографической ориентацией, выращенной по методу А.В. Степанова. На основе полученных результатов была разработана трехэлектродная короткодуговая лампа сверхвысокого давления, которая прошла испытания и подтвердила устойчивость к воздействию механических факторов и циклическому изменению температуры.

Ключевые слова: импульсный разряд, газоразрядная короткодуговая лампа, кварцевая и сапфировая оболочка, ксенон, касательные и осевые напряжения, ударная волна, давление газа, температурный градиент.

В настоящее время широкое распространение получили импульсные лампы с кварцевой и сапфировой (корундовой) оболочками (колба, разрядная трубка). Колба является самым энергетически нагруженным элементом конструкции, основным функциональным назначением которой является не только обеспечение пропускания оптического излучения без потерь, но и сохранение целостности газоразрядной лампы в условиях воздействия ударных волн, давления разогретого газа, раскаленных продуктов эрозии материала электродов, наличия продольных и радиальных градиентов температуры.

Из литературных источников известно [1–3], что увеличение электрической мощности разряда приводит к возрастанию интенсивности воздействия перечисленных теплофизических факторов. В таких условиях актуальной задачей является выбор такой толщины стенки разрядной колбы, чтобы возникающие в ней термоупругие напряжения не превышали предельных величин, при которых происходит разрушение лампы. При этом, согласно монографии [2], для надежной эксплуатации газоразрядной лампы при ее конструировании требуется обеспечить десятикратный запас по прочности оболочки.

Для того чтобы избежать значительного объема экспериментальных исследований, необходимо с пригодной для инженерных расчетов точностью определить толщину стенки разрядной оболочки. Для решения поставленной задачи необходимо последовательно изучить:

- температурные поля газоразрядной лампы-аналога, чтобы установить максимальную величину рабочей температуры колбы $T_{об}$,
- температурную зависимость предельной прочности кварцевого стекла и монокристаллического сапфира,
- рассчитать напряжения в оболочке под воздействием давления разогретого газа, ударных волн, тепловых напряжений из-за градиента температуры в стенке и сопоставить полученные данные с прочностными возможностями материалов при рабочей $T_{об}$.

Исходные данные для расчета были выбраны из следующих соображений. Из работ [1, 2] известно, что давление ксенона в колбе короткодуговой лампы при рабочей температуре увеличивается от 2,5 до 3 раз, т.е. в случае нашей конструкции эта величина может достигать 18 атм. С учетом ранее высказанной рекомендации расчет необходимо проводить для 180 атм, т.е. для десятикратного запаса прочности.

Тепловые поля оболочки лампы

Для исследования продольного температурного профиля колбы лампы-аналога ДКсШ-150 нами использована тепловизионная методика регистрации ИК-излучения разогретых тел [4]. Полученные результаты представлены на рис. 1.

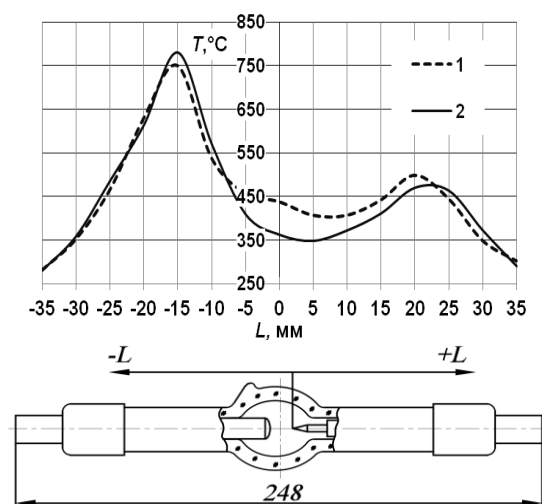


Рис. 1. Продольное распределение температуры верхней (1) и нижней (2) поверхностей колбы короткодуговой лампы СВД

В качестве точки отсчета нами принято пространственное положение острого катода. Как видно из полученных данных, тепловое распределение неравномерно, и в зоне анода температура достигает величины 750 °C. Данное явление связано с ионной бомбардировкой рабочей поверхности анода. Выполненные нами в работе [4] тепловизионные исследования различных ламп показали близкие зна-

чения максимальной температуры оболочки (700–800 °С).

Устойчивость кварцевых и сапфировых труб к внутреннему давлению

Второй по значимости задачей является изучение устойчивости кварцевых и сапфировых оболочек к воздействию давления на их внутреннюю поверхность и определение предельной величины, при которой происходит разрушение стенки. В случае кварцевого стекла нами исследования не проводились, так как этот вопрос достаточно подробно изучен и обобщен в работе [5]. Несмотря на противоречивые результаты исследований различных специалистов, для практических расчетов рекомендована величина напряжения разрушения около 100–140 МПа при $T_{об} = 800$ °С.

Сапфир обладает одним существенным недостатком, а именно анизотропией коэффициента теплового расширения, поэтому можно ожидать, что разрушение сапфировой оболочки будет происходить по-разному при выращивании в различных кристаллографических направлениях. На рис. 2 представлена полученная нами температурная зависимость прочности стенки при выращивании сапфировой трубы в кристаллографических направлениях [0001] и [1012].

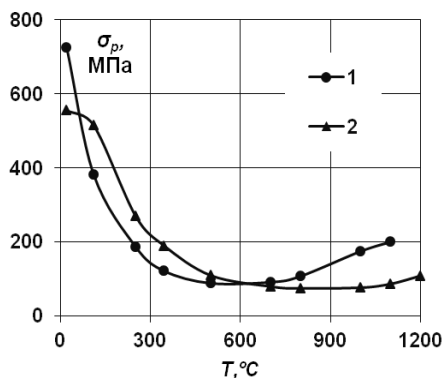


Рис. 2. Температурная зависимость прочности безблочной сапфировой трубы. Кристаллографическое направление: 1 – [0001], 2 – [1012]

Для определения σ_p нами использовалось пластическое вещество, которое размещалось в центре внутреннего объема цилиндрического образца. Продольное воздействие на пластичную среду равномерно передавало прилагаемое усилие по радиальному направлению.

Как видно из представленных на рис. 2 данных, независимо от кристаллографического направления выращивания устойчивость к разрушению снижается, достигая минимума 100 МПа при температуре исследуемых образцов 800 °С. Наличие минимумов на полученных кривых связано с наложением процессов пластической деформации и разрушения. Важно отметить установленный нами результат, который связан с блочностью структуры. При комнатной температуре механическая прочность сапфирового цилиндрического образца снижается с 800 до 200 МПа при увеличении количества блоков до 6 шт.

в поперечном сечении трубы. Это связано со сдвиговыми деформациями по границам блоков.

Давление фронта ударной волны

В работе [1] приведено следующее уравнение, характеризующее давление на оболочку фронтом ударной волны p_Φ :

$$p_\Phi \approx 3,2 \left(\frac{p_0}{L} \right)^{0,5} \frac{U_0^{0,64}}{l^{0,4}}, \quad (1)$$

где p_0 – давление ксенона; U_0 , L – напряжение и индуктивность разрядного контура, соответственно, l – расстояние между электродами.

В нашей публикации [5] были проведены исследования короткодуговой газоразрядной лампы, поэтому для оценки давления p_Φ учтем используемые режимы эксплуатации: $p_0 = 6$ атм, $U_0 = 1000$ В, $L = 0,2$ нГн, $l = 6$ мм. Расчет по формуле (1) дает значение 2,5 МПа, что позволяет нам не рассматривать p_Φ как влияющий на прочность оболочки воздействующий фактор.

Напряжения от давления разогретого рабочего газа

При наличии внутреннего давления p , которое превышает внешнее, колба испытывает разрывающие усилия [2]. При этом касательные напряжения $\sigma_{дк}$ в толще стенки разрядной трубки снижаются по мере перехода от внутренней к внешней поверхности. Касательные и осевые напряжения нами оценивались по уравнениям (2) и (3):

$$\sigma_{дк} = p \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{до} = p \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (3)$$

где p – давление наполняющего газа, r , r_1 , r_2 – текущий, внутренний и внешний радиусы оболочки.

Графические данные, полученные по уравнениям (2) и (3), показаны на рис. 3, из которых следует, что $\sigma_{дк}$ и $\sigma_{до}$ снижаются при увеличении толщины стенки, стремясь к постоянной величине, начиная с $h = 2,5$ мм.

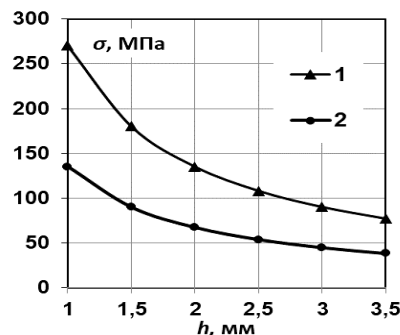


Рис. 3. Взаимосвязь $\sigma_{дк}$ (1) и $\sigma_{до}$ (2) с толщиной оболочки

Установленное явление обусловлено падением растягивающих напряжений на внешней поверхности разрядной оболочки.

Тепловые напряжения в стенке оболочки

При работе газоразрядной лампы при поглощении части излучения и под воздействием тепловых

потоков из плазмы в стенке колбы возникает значительный градиент температуры. В результате этого процесса на внутренней поверхности разрядной трубки формируются сжимающие напряжения, а на внешней части преобладают растягивающие усилия. В своей работе [2] Г.Н. Рохлин предложил следующую систему уравнений для вычисления касательных $\sigma_{\text{ТК}}$ и осевых $\sigma_{\text{ТО}}$ напряжений, возникающих в стенке оболочки под воздействием теплового потока q_1 :

$$\sigma_{\text{ТК}} = q_1 \cdot \frac{C}{2} \left[r_1 + r_1 \ln \frac{r}{r_1} - \frac{r_2^2 \cdot r_1}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{ТО}} = q_1 \cdot C \cdot v \left[\frac{r_1}{2} + \frac{r_1}{v} \ln \frac{r}{r_1} - \frac{r_2^2 \cdot r_1}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right], \quad (5)$$

$$C = \frac{\alpha \cdot E}{\lambda(1-v)}, \quad (6)$$

где r_1 , r_2 – внутренний и наружный радиусы оболочки соответственно, α – коэффициент линейного теплового расширения, E – модуль Юнга, v – коэффициент Пуассона, λ – коэффициент теплопроводности материала оболочки.

Использование уравнений (4)–(6) позволило нам рассчитать составляющие $\sigma_{\text{ТК}}$ и $\sigma_{\text{ТО}}$ тепловых напряжений, возникающие при постоянном внутреннем радиусе и наращивании толщины стенки оболочки (рис. 4).

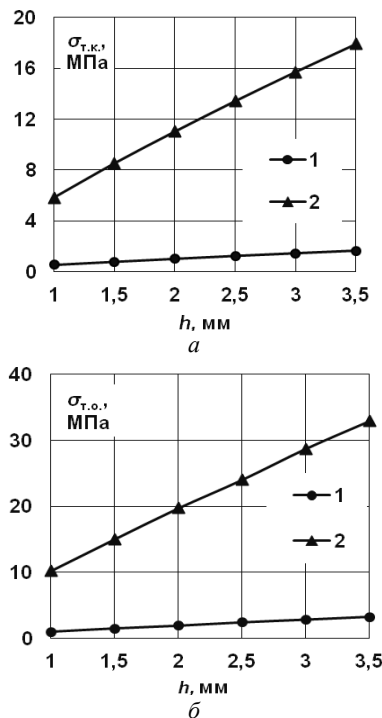


Рис. 4. Влияние толщины стенки сапфировой (1) и кварцевой (2) колбы на касательные (а) и осевые (б) напряжения

Удельный тепловой поток на оболочку существенно зависит от диаметра и длины плазменного канала, давления ксенона, режимов работы газоразрядной лампы. Тем не менее при всех конструктив-

ных различиях источников излучения удельные тепловые потери составляют около 20% от энергии разряда [1], поэтому в наших расчетах мощность, расходуемая на нагрев колбы, принималась 20 Вт.

Выбор толщины стенки

Для установления толщины стенки колбы в зоне разрядного промежутка необходимо сопоставить данные, представленные на рис. 2–4, из которых следует, что при рабочей температуре 750–800 °С (см. рис. 1) предельная величина прочности для кварцевой оболочки составляет 120–140 МПа [5], а для сапфировой разрядной трубки – 120 МПа. Исходя из кривых, показанных на рис. 3 и 4, можно определить, что для обеспечения устойчивости оболочки к напряжениям разрушения толщина стенки должна быть не менее 2,0 мм. В свою очередь, значительное увеличение толщины стенки не рекомендуется в силу возрастания потерь световых характеристик газоразрядной лампы, обусловленных поглощением излучения материалом оболочки.

Испытание разработанной лампы

По результатам расчета с использованием разработанного алгоритма нами была изготовлена экспериментальная трехэлектродная импульсная короткодуговая лампа, представленная на рис. 5.



Рис. 5. Конструкция трехэлектродной короткодуговой лампы

Проведенные испытания подтвердили устойчивость конструкции газоразрядного источника УФ-излучения к следующим воздействующим факторам:

- синусоидальная вибрация в диапазоне частот 1–500 Гц с амплитудой ускорения 200 м/с²,
- механический удар многократного действия с пиковым ударным ускорением 200 м/с²,
- механический удар однократного действия с пиковым ударным ускорением 1000 м/с²,
- циклическое изменение температур от –60 до +80 °С.

Результаты испытаний – положительные.

Заключение

На основании вышеизложенного можно предложить следующую последовательность проведения расчета толщины оболочки газоразрядной лампы:

- Изучить продольное распределение температуры газоразрядной лампы-аналога при идентичной удельной электрической нагрузке на разрядную трубку.
- Рассчитать по уравнениям (2)–(6) предельные напряжения в колбе, исходя из эксплуатационных требований к внутреннему диаметру разрядной оболочки.
- Сопоставить их с полученными в данной работе результатами по напряжениям разрушения сапфира и кварцевого стекла, тем самым определив толщину стенки разрядной части колбы лампы.

Литература

1. Маршак И.С. Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
3. Гавриш С.В. Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 42–51.
4. Гавриш С.В. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // Успехи прикладной физики. – 2020 – Т.8, № 4. – С. 251–260.
5. Андреев Ю.П. Физико-технические свойства кварцевых стекол для оболочек источников высокоинтенсивного света / Ю.П. Андреев, Р.В. Браиловская, Н.А. Воскресенская // Обзоры по электронной технике. – 1976. – Сер. 11, вып. 8. – 75 с.
6. Исследование характеристик импульсного источника УФ-излучения на основе короткодугового разряда в ксеноне / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, А.О. Потапенко и др. // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т. 11, № 6. – С. 503–510.

Гавриш Сергей Викторович

Д-р техн. наук, нач. отд. источников света НПО «Мелитта»
Эл. почта: svgavr@list.ru

Потапенко Алексей Олегович

Науч. сотр. НПО «Мелитта»
Эл. почта: l_potapenko99@mail.ru

Чиликина Полина Александровна

Мл. науч. сотр. НПО «Мелитта»
Эл. почта: p.chilikina@gmail.com

М.В. Шандриков, А.С. Бугаев, А.А. Черкасов

Влияние потенциала экспандера на ионный ток и масс-зарядовый состав ионов плазмы магнетронного разряда

Представлены результаты влияния электрического потенциала полого экспандера, с границы которого осуществляется отбор и ускорение ионов, на максимальную величину извлекаемого ионного тока и масс-зарядовый состав ионов в плазме. В качестве генератора плазмы использовался планарный магнетрон. Рабочим газом выступал аргон. Разряд функционировал в непрерывном режиме при токе 500 мА при давлении 0,4 Па. Показано, что увеличение отрицательного потенциала за счет дополнительной осцилляции электронов обеспечивает кратное увеличение ионного тока, при этом долевое отношение металлического и газового ионных компонентов в плазме практически не меняется.

Ключевые слова: магнетронный разряд, ионный ток, масс-зарядовый состав, плазма.

Ионные источники нашли широкое применение в методах ионной модификации поверхности материалов [1–3]. Ионный состав пучка, как правило, задается устройством, генерирующим плазму в области электрода (экспандера), с границы которого осуществляется отбор ионов и формирование ионного пучка. Магнетронный разряд в планарной геометрии электродов, функционирующий в типичном диапазоне рабочего давления от 0,1 Па и выше, достаточно редко используется в качестве генератора плазмы в ионных источниках, прежде всего по причине достаточно высокого рабочего давления, что снижает электрическую прочность ускоряющего промежутка в ионно-оптической системе и увеличивает потери ионов на процессах перезарядки в пространстве дрейфа в области экспандера. Вторым препятствующим фактором является относительно низкая степень ионизации рабочего газа и материала мишени (единицы процентов) при функционировании магнетронного разряда в непрерывном режиме с током не более единиц ампер [4].

Переход в высокопоточный импульсный режим в магнетронном разряде (так называемый режим HIPIMS) с амплитудным значением тока до 100 А и выше позволяет как минимум на порядок увеличить ионную составляющую в плазме разряда [5–7]. Для снижения рабочего давления была предложена схема с эмиттером электронов на основе импульсного вакуумного дугового разряда, обеспечивающего инжекцию дополнительных электронов и их ускорение в катодном слое магнетронного разряда [8]. Такая инжекция высокоэнергетичных электронов из независимого эмиттера позволилакратно снизить минимальное рабочее давление планарного магнетрона до уровня, применимого в методах ионной имплантации [9].

Однако в предложенной разрядной системе экспандер имеет положительный электрический потенциал (соединен с анодом магнетрона), что ограничивает величину извлекаемого с торца экспандера ионного тока.

Представлены результаты экспериментального исследования возможности увеличения ионного тока из плазмы магнетронного разряда посредством при-

кладывания отрицательного потенциала к полюсу экспандеру, что позволит увеличить концентрацию плазмы за счет организации условий для дополнительной осцилляции электронов. Для упрощения схемы эксперимента и системы электрического питания исследования данного эффекта на данном этапе проводились в типичном диапазоне рабочего давления (выше 0,1 Па) в относительно слаботочной (500 мА) непрерывной форме магнетронного разряда без дополнительной электронной инжекции.

Схема эксперимента

Схема экспериментальной разрядной системы представлена на рис. 1.

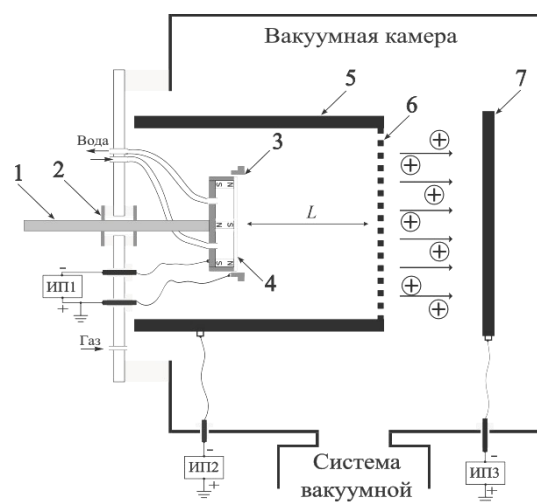


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – штанга вакуумного ввода; 2 – ввод Вильсона; 3 – анод магнетрона; 4 – катод (мишень) магнетрона; 5 – полый экспандер; 6 – сетка экспандера; 7 – коллектор.

Источники питания: ИП1 – магнетронного разряда; ИП2 – смещения экспандера; ИП3 – смещения коллектора

На торце вакуумной камеры устанавливался фланец с вакуумным вводом, состоящим из штанги 1 и ввода Вильсона 2, обеспечивающим возможность аксиального перемещения планарного магнетрона вдоль оси полого экспандера 5. В экспериментах использовался магнетрон с медной мишенью 4 диаметром 51 мм (2") и толщиной 3 мм. Анод магнетрона 3 был заземлен (как и стенки вакуумной

камеры). Водяное охлаждение магнетрона осуществлялось гибкими подводящими трубками. Магнетрон размещался с открытого торца полого экспандера 5, выполненного из нержавеющей немагнитной стали (12X18H10T).

Диаметр и длина экспандера составляли 17 и 20 см соответственно. Противоположный от магнетрона торец экспандера был закрыт сеткой 6 из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью 50%. Проходящий через сетку поток ионов поступал на коллектор 7. Площадь коллектора составляла 250 см². Коллектор был также выполнен из нержавеющей стали 12X18H10T и располагался на расстоянии 2 см от сетки экспандера. Отрицательный потенциал коллектора составлял 150 В. Характерное насыщение бомовского ионного тока на ВАХ коллектора наблюдалось уже при потенциале уровня 100 В. Смещение магнетрона вдоль оси разрядной системы позволяло менять расстояние между магнетроном и сеткой экспандера L .

Рабочий газ (аргон) напускался непосредственно в вакуумную камеру и контролировался электронным регулятором типа РРГ-10 (ООО «Элточ-прибор», г. Зеленоград). Рабочее давление измерялось в вакуумной камере непосредственно под полым экспандером и составляло 0,4 Па. Ток магнетронного разряда составлял 500 мА при напряжении между его электродами порядка 400 В. Электрическое питание осуществлялось от источников стабилизированного напряжения с системой дугогашения (ООО «Прикладная электроника, г. Томск»). Измерение масс-зарядового состава ионов производилось с использованием модифицированного квадрупольного масс-спектрометра RGA-200 (SRS) по методике, подробно описанной в [10].

На рис. 2 представлена зависимость ионного тока на коллектор от расстояния между катодом (мишенью) магнетрона и сеточным торцом экспандера, с границы которого извлекается ионный ток.

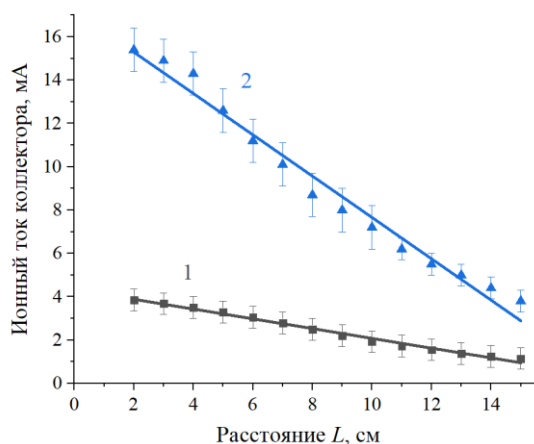


Рис. 2. Зависимость ионного тока на коллектор от расстояния между мишенью магнетрона и сеткой экспандера для нескольких значений потенциала экспандера: 1 – 0 В; 2 – -450 В

С увеличением протяженности рабочей длины полого экспандера (L) величина ионного тока ли-

нейно снижается. Этот результат показывает, что для повышения эмиссионных свойств ионного источника целесообразно сокращение длины экспандера и приближение сеточной границы экспандера к области ионизации магнетрона. Ограничивающими факторами в этом случае могут являться только однородность радиального распределения ионного тока по сечению и влияние сетки экспандера (находящейся под катодным либо анодным потенциалом) на условия зажигания и функционирования магнетронного разряда.

Оптимальным значением L можно считать расстояние порядка 4–5 см. В этом случае между мишенью магнетрона и сеткой экспандера, находящейся под потенциалом мишени магнетрона, формируется электростатическая ловушка для электронов, что обеспечивает их осцилляцию и дополнительную ионизацию рабочего газа и распыленного материала мишени. Результаты показывают, что в этом случае извлекаемый ионный ток при том же токе магнетронного разряда может быть увеличен в 3 раза (с 4 до 13–14 мА).

Важно отметить, что отрицательное смещение экспандера и дополнительная ионизация осциллирующими электронами оказывает незначительное (не более 10%) влияние на долевое отношение ионных компонентов в плазме, с границы которой происходит отбор ионов (рис. 3). Небольшое повышение доли ионов металла может быть связано с меньшим потенциалом ионизации атомов меди (7,7 эВ) по сравнению с потенциалом ионизации аргона (15,6 эВ).

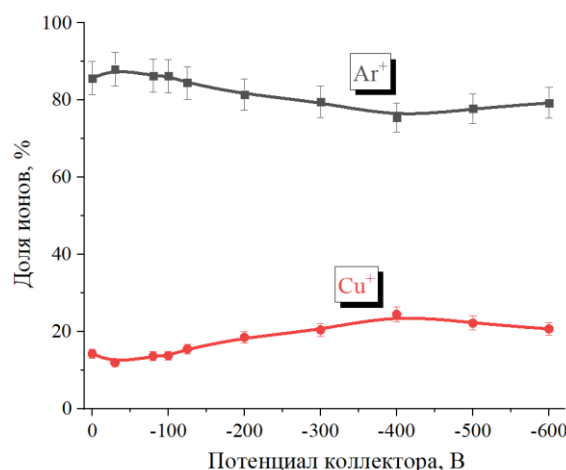


Рис. 3. Масс-зарядовый состав ионов плазмы магнетронного разряда в зависимости от потенциала экспандера

Очевидно, что отрицательный потенциал стенок полого экспандера, обеспечивающий отражение электронов, будет также подвергаться распылению ионами с энергией, практически соответствующей напряжению магнетронного разряда. Это, в свою очередь, может приводить к нежелательному «загрязнению» плазмы частицами материала экспандера. Слабая зависимость долевого состава ионов плазмы от потенциала экспандера дает возможность использования меньшей амплитуды отрицательного

смещения экспандера, обеспечивая даже в этом случае увеличение извлекаемого ионного тока как минимум в 2 раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0006).

Литература

1. Wilson R.G. Ion beams with applications to ion implantation / R.G. Wilson, G.R. Brewer, J.H. Westbrook // Journal of The Electrochemical Society. – 1975. – Vol. 122. – No. 6. – P. 188.
2. Hirvonen J.K. Ion implantation / J.K. Hirvonen, B.D. Sartwell. – ASM Handbook, 1994.
3. Nastasi M., Mayer J. W. Ion implantation and synthesis of materials. – Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
4. Vašina P. et al. Determination of titanium atom and ion densities in sputter deposition plasmas by optical emission spectroscopy // Plasma Sources Science and Technology. – 2015. – Vol. 24, No. 6. – P. 065022.
5. Stranak V. et al. Investigation of ionized metal flux in enhanced high power impulse magnetron sputtering discharges // Journal of applied physics. – 2014. – Vol. 115, No. 15.
6. Klein P. et al. Enhancement of ionized metal flux fraction without compromising deposition rate in industrial magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. – 2024. – Vol. 489. – P. 131142.
7. Ehasarian A.P. et al. Ion composition produced by high power impulse magnetron sputtering discharges near the substrate // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104, No. 8.
8. Shandrikov M.V. et al. Low-pressure high-current magnetron discharge with electron injection: From self-sputtering with multiply charged metal ions to non-sputtering with «pure» gas ions // Vacuum. – 2024. – Vol. 228. – P. 113512.
9. Semin V. et al. Corrosion Performance of Chemically Passivated and Ion Beam-Treated Austenitic–Martensitic Steel in the Marine Environment // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9, No. 5. – P. 167.
10. Shandrikov M.V. et al. Modified residual gas analyzer for measuring the ion mass-to-charge composition of a repetitively pulsed plasma // AIP Advances. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – P. 025017.

Шандриков Максим Валентинович

Канд. техн. наук, с.н.с. лаб. плазменных источников
Института сильноточной электроники СО РАН
(ИСЭ СО РАН)
Эл. почта: shandrikov@opee.hcei.tsc.ru

Бугаев Алексей Сергеевич

Науч. сотр. лаб. плазменных источников ИСЭ СО РАН
Эл. почта: bugaev@opee.hcei.tsc.ru

Черкасов Александр Алексеевич

Мл. науч. сотр. лаб. плазменных источников ИСЭ СО РАН
Эл. почта: cherkasov@opee.hcei.tsc.ru

Секция 10

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Председатели – Буримов Николай Иванович,
и.о. зав. каф. ЭП, д.ф.-м.н.;*

Акрестина Анна Сергеевна, доцент каф. ЭП, к.ф.-м.н.

В.Н. Давыдов, А.В. Цыкалова

Инжекция носителей заряда в светодиодной гетероструктуре

Установлены особенности инжекции носителей в светодиодной гетероструктуре с множественными квантовыми ямами. Показано, что при прямых смещениях доминирующим механизмом токопротекания является надбарьерная диффузия основных носителей заряда. Ключевая особенность инжекции в множественные квантовые ямы заключается в формировании результирующего тока носителей заряда через структуру из нескольких токов, различающихся по своему взаимодействию с квантовыми ямами: тока диффузии, сквозного тока и тока инжекции.

Ключевые слова: гетероструктура, квантовая яма, сквозной ток, диффузионный ток, ток инжекции.

Эффективность светодиодной гетероструктуры (ГС) с множественными квантовыми ямами (МКЯ) напрямую зависит от механизмов инжекции носителей заряда в активную область. Понимание процессов захвата электронов и дырок в квантовые ямы (КЯ) определяет ключевые параметры источника излучения: люминесцентные характеристики, коэффициент полезного действия и т.д. [1].

Анализ результатов современных исследований [2] показывает, что традиционное представление о токопереносе в ГС, по аналогии с диффузионным p - n -переходом, не позволяет учесть базовых особенностей ГС, а именно наличие КЯ, что является принципиальным отличием функционирования ГС от p - n -перехода. Такой подход не учитывает специфику взаимодействия носителей с КЯ, что приводит к упрощенной трактовке природы тока и механизмов взаимодействия МКЯ и носителей заряда. В результате остаются неучтенными фундаментальные проблемы, связанные с соотношением токов инжекции в n - и p -типные КЯ, конкуренцией между сквозным током и током захвата носителей, процессами эмиссии носителей из КЯ в барьерный слой.

Настоящая работа направлена на устранение этого пробела путем разработки физико-математической модели, адекватно описывающей специфику инжекции и рекомбинации носителей в ГС с МКЯ.

Ограничения традиционной модели Шокли

В классической теории полупроводниковых диодов ток через p - n -переход описывается уравнением

$$I = I_0 [\exp(qV/nkT) - 1], \quad (1)$$

где I_0 – обратный ток; n – коэффициент неидеальности; V – приложенное напряжение; T – температура.

Основные допущения модели Шокли сводятся к следующему: обратный ток определяется диффузией неосновных носителей через обеднённую область, рекомбинация в обеднённой области пренебрежимо мала, квантовые эффекты типа туннелирования, захвата носителей не учитываются.

Эта модель достаточно точно описывает гомопереходы, но ограничена применима к ГС с МКЯ, где действие дискретных энергетических уровней КЯ меняет механизмы переноса, туннелирования и захвата/эмиссии носителей, создает дополнительные каналы тока. При этом излучательная рекомбинация в КЯ становится доминирующим процессом (рис. 1).

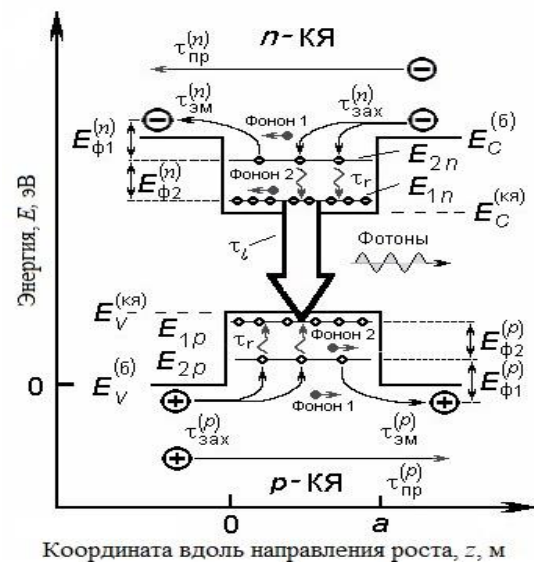


Рис. 1. Зонная диаграмма и схема эмиссии излучения

Токоперенос в ГС с МКЯ

Рассмотрение механизмов токопереноса в ГС с МКЯ целесообразно начать с анализа энергетической диаграммы всей структуры (рис. 2), из которой видно, что наряду с обратным током I_0 и диффузионными токами из эмиттеров $I_{\text{dif}}^{(n)}$ и $I_{\text{dif}}^{(p)}$ в структуре присутствуют дополнительные компоненты, обусловленные наличием МКЯ.

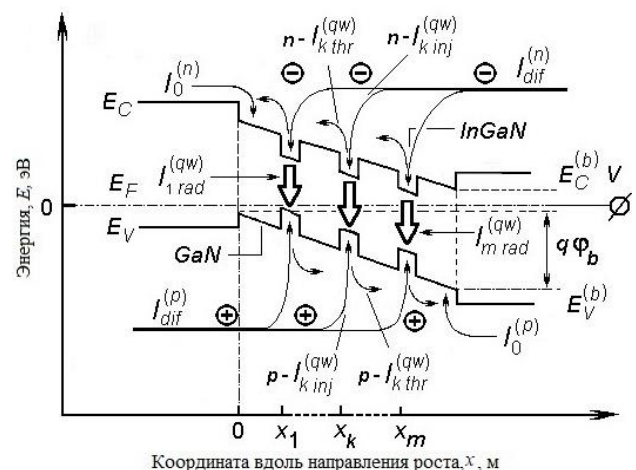


Рис. 2. Схема протекания диффузионного, инжекционного, сквозного и обратного токов в ГС с МКЯ

Сквозной ток $I_{thr}^{(b)}$, не взаимодействующий с ямами, аналогичен надбарьерному току в диффузионном $p-n$ -переходе. Специфичными для МКЯ являются инжекционные токи в k -е ямы $(n - I_{k inj}^{(qw)}, p - I_{k inj}^{(qw)})$ и сквозные токи через ямы $(n - I_{k thr}^{(qw)}, p - I_{k thr}^{(qw)})$, возникающие из-за термоэмиссии захваченных носителей. Эти токи связаны соотношением

$$I_{k inj}^{(qw)} = I_{k rad}^{(qw)} + I_{k thr}^{(qw)}, \quad (2)$$

где $I_{k rad}^{(qw)}$ – ток излучательной рекомбинации в k -й яме.

Полный ток основных носителей определяется суммой сквозного тока и токов, перечисленных выше.

$$I_{main}(V) = \sum_{k=1}^m I_{k rad}^{(qw)}(V) + \sum_{k=1}^m I_{k thr}^{(qw)}(V) + I_{thr}^{(b)}(V). \quad (3)$$

Для понимания процессов инжекции и рекомбинации необходимо проанализировать физику переноса заряда на уровне отдельной пары КЯ (рис. 2). Энергетическая диаграмма пары n -КЯ и p -КЯ, расположенных в одном слое, показывает дискретные уровни размерного квантования. Заполнение этих уровней носителями происходит из барьерных слоев, где концентрации $n_n(x_k)$ и $p_p(x_k)$ описываются диффузионными законами. Излучательные переходы показаны большими стрелками. Количество рекомбинирующих пар $N_{np}^{(qw)}(x_k)$ ограничено концентрацией носителей заряда того знака, которых в яме меньше. Ток излучения для всей ГС является суммой вкладов от всех пар ям:

$$I_{rad}(V) = qS \cdot \sum_{k=1}^m \left[\frac{N_{np}^{(qw)}(x_k, V)}{\tau_{rad}^{(qw)}} \right]. \quad (4)$$

Здесь $\tau_{rad}^{(qw)}$ – время излучательной рекомбинации между состояниями КЯ; S – площадь ГС.

Таким образом, макроскопическое представление о параллельных токах (см. рис. 1) находит свое микроскопическое обоснование в механизмах захвата, рекомбинации и эмиссии носителей в отдельных квантовых ямах (см. рис. 2). Соотношение между этими процессами, определяемое временами рекомбинации и эмиссии, должно найти свое отражение на структуре вольт-амперной характеристики и эффективности генерации излучения ГС в целом.

Математическая модель эмиссии излучения

Основной принцип составления модели функционирования светоизлучающей ГС заключается в разложении полного тока I $p-n$ -перехода на две компоненты: диффузионный ток I_{dif} и инжекционный ток I_{inj} . Тогда величина суммарного тока будет определяться следующим образом:

$$I(V) = I_{dif}(V) + I_{inj}(V). \quad (5)$$

Такое разложение соответствует представлению, что часть носителей проходит область пространственного заряда (ОПЗ) по классическому диффузионному механизму, часть – сквозному токопротеканию без участия в рекомбинации, а часть захватывается квантовыми ямами, это следует из (2) и (5).

1. Диффузионный ток I_{dif} описывает классический поток неосновных носителей через $p-n$ -переход под действием градиента концентрации. В линейном приближении его можно задать уравнением Шокли.

2. Сквозной ток I_{thr} – это ток носителей, которые не захватываются КЯ, а проходят через активную область по туннельному механизму или «сохраняя высокую энергию» над потенциальным барьером. Сквозной ток складывается из двух составляющих.

Первая из них $I_{thr}^{(b)}$ описывает надбарьерный ток основных носителей, которые не взаимодействуют с квантовыми ямами. Вторая компонента сквозного тока $I_{thr}^{(qw)}(V) = \sum_{k=1}^m I_{k thr}^{(qw)}(V)$ образована

носителями, которые на пути движения к эмиттеру носителей противоположного заряда последовательно захватываются одной или несколькими квантовыми ямами на время $\tau_{em}^{(qw)}$. Это выражение показывает, что сквозной ток растёт экспоненциально с напряжением, но со сдвигом по порогу.

3. Инжекционный ток I_{inj} – поток носителей, которые захватываются в квантовые ямы и рекомбинируют в них с излучением фотонов. Поскольку ток инжекции расходуется на создание сквозного тока по КЯ и тока излучения, то

$$I_{k inj}^{(qw)}(x_k) = I_{k rad}^{(qw)}(x_k) + I_{k thr}^{(qw)}(x_k). \quad (6)$$

Отсюда найдем, что $1/\tau_{inj}^{(qw)} = 1/\tau_{rad}^{(qw)} + 1/\tau_{em}^{(qw)}$,

где $\tau_{rad}^{(qw)}$ – время излучательной рекомбинации в КЯ. Тогда эффективность излучения света КЯ можно оценить с помощью введения параметра

$$\eta_{rad}^{(qw)} = \frac{I_{rad}^{(qw)}}{I_{em}^{(qw)} + I_{rad}^{(qw)}} = \frac{\tau_{em}^{(qw)}}{\tau_{em}^{(qw)} + \tau_{rad}^{(qw)}}. \quad (7)$$

Суммируя составляющие диффузионного тока и тока инжекции, полный ток через ГС с множественными квантовыми ямами равен

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &= \eta_{thr}^{(b)} \cdot I_0 + \eta_{inj}^{(qw)} \cdot \left(I_{rad}^{(qw)} + I_{thr}^{(qw)} \right) = \\ &= I_0 \cdot \left(1 - \eta_{inj}^{(qw)} \right) + \eta_{inj}^{(qw)} \cdot \left(I_{rad}^{(qw)} + I_{thr}^{(qw)} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Как следует из (8), при отсутствии инжекции носителей заряда, например, отсутствии КЯ, $\tau_{inj}^{(qw)}$ становится бесконечно большим. Это приводит к

тому, что коэффициент инжекции $\eta_{inj}^{(qw)}$ обращается в нуль. В результате этого полный ток через гетероструктуру становится равным обратному току $I_{\Sigma} = I_0$, и выражение для ВАХ ГС совпадёт с выражением Шокли для диффузионного p – n -перехода.

Выводы

Проведено рассмотрение механизмов протекания токов, позволяющее связать форму ВАХ со свойствами МКЯ и барьеров, показано, что изменение высоты барьера меняет вклад сквозного тока, а параметры КЯ (ширина, энергия уровней) определяют эффективность инжекции носителей. Модель позволяет анализировать ВАХ при варьировании технологических параметров и оптимизировать характеристики ГС для достижения максимальной квантовой эффективности генерации оптического излучения.

Литература

1. Schubert E.F. Light-Emitted Diodes. – Cambridge, 2006. – 436 p.
8. William Shockley. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p – n -Junction Transistors // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28. – P. 435–489.

Давыдов Валерий Николаевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. электронных приборов (ЭП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: dvn@fet.tusur.ru

Цыкалова Анна Валерьевна

Магистрант каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: kutsa0@mail.ru

Ф.Н. Хайруллин, В.А. Ивасенко, И.Н. Кореньков,
С.С. Булатов, Р.И. Анисимов, А.А. Колмаков

Термодиффузионное легирование ниобата лития медью, нанесенной методом химического осаждения

Проведено исследование термодиффузионного легирования ниобата лития (LiNbO_3) медью для модификации его оптико-электронных свойств. Медные плёнки наносились методами химического осаждения и магнетронного распыления с последующим отжигом. Установлено, что химическое осаждение обеспечивает более высокую приповерхностную концентрацию ионов Cu^+ и Cu^{2+} , но с более локализованным распределением по сравнению с магнетронным напылением.

Ключевые слова: ниобат лития, легирование, химическое осаждение, медь.

Кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) являются ключевым материалом для оптоэлектроники и фотоники благодаря своим нелинейным и электрооптическим свойствам. Однако их исходные характеристики часто требуют модификации для использования в современных системах квантовой и оптической электроники. Одним из эффективных методов управления свойствами LiNbO_3 является легирование ионами металлов, в частности, медью, которая способна существенно повысить электропроводность и изменить оптические параметры кристалла [1].

В работе представлены результаты термодиффузионного легирования двух образцов LiNbO_3 с предварительно сформированными медными плёнками субмикрометровой толщины, полученными двумя методами – химическим осаждением (№ 1) и магнетронным распылением (№ 2), и их сопоставление.

Методы и материалы

На основе известной технологии [2] была применена и адаптирована методика химического осаждения меди из водного раствора на основе её нитрата ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) с использованием формалина в качестве восстановителя и виннокислого калий-натрия (сегнетовой соли) в качестве комплексообразователя. Критически важными параметрами процесса, определенными экспериментально, являлись: значение $\text{pH} = 11,0\text{--}11,5$, температура раствора $65 \pm 5^\circ\text{C}$ и время осаждения 40–60 мин.

Состав раствора

Компонент	Количество на 100 мл	Назначение
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	1,5 г	Источник ионов Cu^{2+}
$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (виннокислый калий-натрий)	8,0 г	Комплексообразователь, стабилизатор ионов Cu^{2+}
NaOH	1,0 г	Щелочное основание, коррекция pH
Аммиак (25%)	По потребности (до $\text{pH} \approx 11,5$)	Комплексообразователь, коррекция pH
Глицерин	0,1 г	Стабилизатор роста слоя
Формалин (37%)	1,5 мл	Восстановитель
Дистиллированная вода	До 100 мл	Растворитель

Для исследования морфологии, толщины и элементного состава полученных покрытий использовалась растровая электронная микроскопия (РЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС).

Процесс термодиффузионного легирования меди осуществлялся при 800°C в течение 12 ч для двух кристаллов. Пространственное распределение внедрённой меди в ионных состояниях Cu^+ и Cu^{2+} исследовались методом спектроскопии пропускания, описанным в работе [3].

Для этого использовалось лазерное излучение с длинами волн 532 и 808 нм, что позволило экспериментально восстановить профиль концентрации по глубине образца на основе зависимости коэффициента поглощения от координаты x . Предполагалось, что основной вклад в поглощение на этих длинах волн вносят ионы меди в зарядовых состояниях Cu^+ и Cu^{2+} соответственно. Полученные экспериментальные данные представлены точками на рис. 1–4.

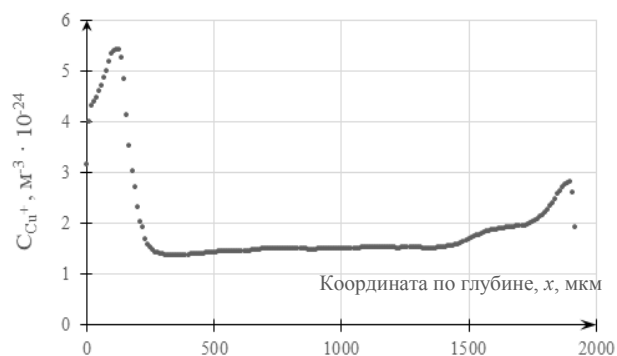


Рис. 1. Профиль распределения в диффузионной структуре № 1 X-среза $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ для ионов меди в зарядовых состояниях Cu^+

На рис. 3 и 4 представлены профили распределения меди в образце № 2, где медная плёнка была нанесена методом магнетронного распыления.

Для определения коэффициента поглощения и расчёта концентраций ионов меди использовали соотношения, приведённые в [3].

$$k(x) = -\frac{1}{d} \ln \frac{I_t(x)}{I_{t_{\max}}}, \quad (1)$$

где d – толщина кристалла вдоль оси X ; I_t – значение регистрируемого фототока для структуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$; $I_{t\text{max}}$ – максимальное значение регистрируемого фототока для структуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

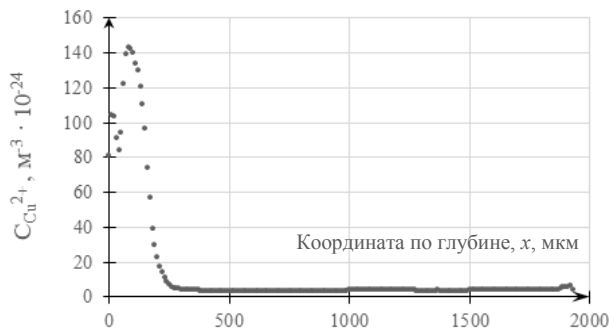


Рис. 2. Профиль распределения в диффузионной структуре № 1 X-среза $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ для ионов меди в зарядовых состояниях Cu^{2+}

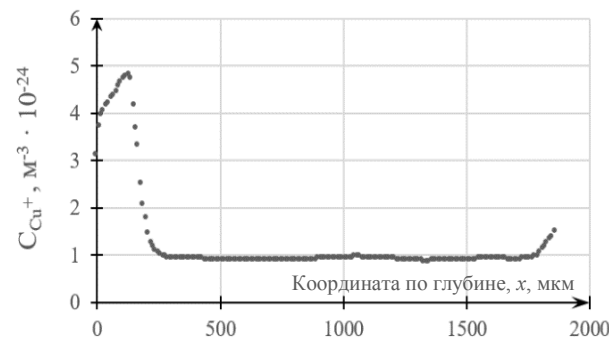


Рис. 3. Профиль распределения в диффузионной структуре № 2 X-среза $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ для ионов меди в зарядовых состояниях Cu^+

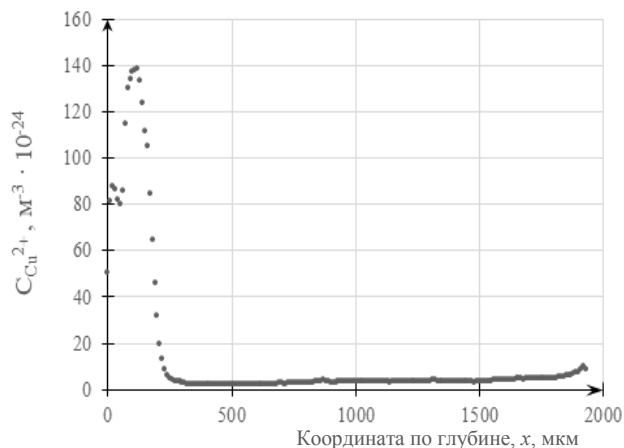


Рис. 4. Профиль распределения в диффузионной структуре № 2 X-среза $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ для ионов меди в зарядовых состояниях Cu^{2+}

Концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+} определились по формулам [4]:

$$C_{\text{Cu}^+}(x) = 4,72 \cdot 10^{21} \cdot k_{532}(x), \quad (2)$$

$$C_{\text{Cu}^{2+}}(x) = 1,56 \cdot 10^{23} \cdot k_{808}(x), \quad (3)$$

где $k_{532}(x)$ и $k_{808}(x)$ – коэффициенты поглощения на длинах волн 532 и 808 нм.

В результате концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+} для кристаллов № 1 и № 2 были получены $C^{(1)}_{\text{Cu}^+} = 2,02 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $C^{(1)}_{\text{Cu}^{2+}} = 4,51 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $C^{(2)}_{\text{Cu}^+} = 1,35 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $C^{(2)}_{\text{Cu}^{2+}} = 4,18 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, соответственно.

Количественное сравнение диффузионных профилей свидетельствует, что нанесение меди методом химического осаждения обеспечивает более высокие приповерхностные максимумы концентраций (Cu^+ до $5,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$; Cu^{2+} до $1,43 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$), по сравнению с образцом, для которого использовалось магнетронное распыление (Cu^+ до $4,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$; Cu^{2+} до $1,4 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$). В то же время, для химического осаждения характерны выраженная приповерхностная локализация примеси и снижение концентрации к объему, тогда как после магнетронного распыления профиль по глубине ближе к равномерному.

Результаты и обсуждение

Для пленки, осажденной химическим методом, РЭМ-анализ показал мелкозернистую структуру слоя, а ЭДС-спектры однозначно идентифицировали наличие металлической меди. Последующая термообработка привела к успешному внедрению меди в кристаллическую решетку.

Профили распределения, полученные спектроскопическим методом, показали, что легирование медью, нанесенной химическим осаждением, приводит к более высокой поверхностной концентрации ионов ($\text{Cu}^+ \approx 5,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\text{Cu}^{2+} \approx 1,43 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$) по сравнению с образцом, где медь наносилась методом магнетронного напыления. При этом распределение примеси оказалось более локализованным в приповерхностной области.

Заключение

Разработанный комбинированный метод химического осаждения и термодиффузии доказал свою эффективность для легирования ниобата лития медью. Метод отличается доступностью оборудования и реагентов, а также высокой воспроизводимостью результатов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются изучение влияния температуры диффузии на её глубину и оптимизация состава раствора для управления толщиной металлического слоя.

Литература

1. Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum / A. Boes, L. Chang, C. Langrock, M. Yu, M. Zhang, Q. Lin, M. Loncar, M. Fejer, J. Bowers, A. Mitchell // Science. – 2023. – Vol. 379, № 6627. – P. eabj4396. DOI: 10.1126/science.abj4396.
2. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1985. – 103 с.
3. Колмаков А.А. Исследование распределения меди в структуре $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с поверхностным легированием / А.А. Колмаков, А.С. Темерева, Р.И. Анисимов и др. // Тез. докл. XXXIII Всерос. школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» им. А.П. Сухорукова («Волны–2022»). – 2022. – С. 58–61.

4. Peithmann K. et al. Photorefractive properties of LiNbO_3 crystals doped by copper diffusion // Physical Review B. – 2000. – Vol. 61, No. 7. – P. 4615.

Хайруллин Фёдор Николаевич

Студент каф. электронных приборов (ЭП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: fedor.genzer@mail.ru

Ивасенко Владимир Андреевич

Студент каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: vova.ivasenko04@mail.ru

Кореньков Илья Николаевич

Студент каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: ilya.korenkov2004@gmail.com

Булатов Серафим Сергеевич

Студент каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа
Эл. почта: serafimasbul@gmail.com

Анисимов Роман Игоревич

Аспирант каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: roman.anisimov.00@mail.ru

Колмаков Александр Андреевич

Ассистент каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: aleksandr.a.kolmakov@tusur.ru

Секция 11

ОРГАНИЧЕСКАЯ И НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА

*Председатель – Туев Василий Иванович,
зав. каф. РЭТЭМ, проф., д.т.н.*

А.Е. Голых, Д.В. Фомин

Разработка тепловакуумной камеры, оборудованной имитатором солнечного света для испытаний МКА

Рассматривается процесс проектирования тепловакуумной камеры, предназначенной для наземных испытаний малых космических аппаратов (МКА) стандарта CubeSat. Особенностью разработки является применение в качестве имитатора солнечного света массива полупроводниковых светодиодов, установленных внутри вакуумного объема. Данное решение представляется более перспективной и доступной альтернативой традиционным сложным системам на основе ксеноновых ламп. Конструкция камеры включает криоэкран для создания рабочего вакуума и регулирования температурного режима, а также узел вращения, позволяющий изменять ориентацию испытываемого спутника относительно источника излучения. Это обеспечивает моделирование условий работы МКА на низкой околоземной орбите, включая воздействие солнечного излучения и изменение пространственного положения аппарата. Представленная тепловакуумная камера является частью работ по созданию собственной испытательной инфраструктуры в НОЦ им. К.Э. Циолковского АмГУ.

Ключевые слова: малый космический аппарат, тепловакуумные испытания, солнечный имитатор, криоэкран, CubeSat.

На текущий момент времени одними из наиболее часто запускаемых космических аппаратов являются спутники стандарта CubeSat. Такие малые космические аппараты (МКА) запускаются на низкие околоземные орбиты, не превышающие 500–600 км, давление на этих орбитах находится в диапазоне от $1,3 \times 10^{-3}$ до $1,3 \times 10^{-5}$ Па. В процессе своей работы спутник преобразует солнечную энергию в электрическую с помощью фотоэлектрических преобразователей, при этом освещаемые части МКА нагреваются [1–3].

Таким образом, для проведения корректных тепловакуумных наземных испытаний (являющихся обязательными для получения допуска к запуску МКА) необходимо моделирование трех ключевых параметров околоземной орбиты: низкого давления, изменяющейся температуры и солнечного излучения. Это обуславливает необходимость использования вакуумной камеры с криоэкраном, внутри которой также размещается источник света – солнечный имитатор.

Любая вакуумная среда, в том числе на низких околоземных орбитах, исключает конвективный теплообмен. Одновременно с этим солнечный имитатор обеспечивает воздействие на испытываемый спутник CubeSat не только светового потока, необходимого для тестирования эффективности работы фотоэлектрических преобразователей, но и тепловой нагрузки, аналогичной поглощению солнечного излучения спутником в космосе.

Влияние радиационного фактора в рамках испытаний МКА не учитывается, так как на низких околоземных орбитах защитную функцию выполняет еще довольно сильное электромагнитное поле Земли.

В общем виде тепловакуумные камеры для испытаний МКА принципиально разделяются на два типа: статические, где аппарат неподвижно закреплен на термостоле, и динамические – с системой вращения, которые позволяют моделировать различные ориентации спутника относительно положения

светового потока для более точного воспроизведения работы МКА на его орбите. И те и другие камеры оснащаются имитатором солнечного света, для работы которого необходимы следующие основные компоненты, обычно это: ламповый модуль, состоящий из ксеноновой лампы (может включать в себя сборку из нескольких ламп в случаях необходимости получения высокой мощности светового потока) с устройством для ее поджига и охлаждения, оптическое устройство фокусировки светового потока, коллимирующее зеркало, предназначенное для равномерного распределения светового потока на исследуемый космический аппарат [1–3].

Такие конструкции тепловакуумных камер на основе ксеноновых ламп достаточно сложны для реализации, поэтому в настоящее время научным сообществом ведется поиск новых источников, имитирующих солнечное излучение, более доступных для широкого круга пользователей. В качестве таких перспективных источников в настоящее время рассматривают солнечные имитаторы на основе полупроводниковых светоизлучающих диодов, которые можно устанавливать непосредственно внутри вакуумной камеры.

В качестве примера реализации солнечного имитатора на светодиодных элементах является устройство, представленное в изобретении RU2840234 C1 «Имитатор солнечного излучения». В изобретении описывается устройство, которое обеспечивает однородное излучение на небольшой площади перед собой. Представленное устройство в контексте испытаний спутников стандарта CubeSat, возможно использовать в виде набора нескольких элементов для равномерного освещения всей поверхности спутника, находящегося в тепловакуумной камере [4].

Принимая во внимание вышенаписанное, данная работа является продолжением исследований [5, 6], направленных на создание собственной испытательной инфраструктуры МКА в НОЦ им. К.Э. Циолковского АмГУ. Ниже представлены этапы проек-

тирования тепловакуумной камеры, использующей в качестве солнечного имитатора светодиодные полупроводниковые диоды.

В общем виде спроектированное устройство представлено на рис. 1 и состоит из опор 1; основного корпуса 2; торцевого фланца 3, который является съёмным для установки исследуемого спутника; торцевого фланца 4, на котором установлен ввод вращения МКА; охлаждающего контура (криоэкрана) с штуцерами подвода хладагента 5; нижнего фланца 6, предназначенного для установки регистрирующих датчиков; верхнего фланца 7 с размещенным на нем солнечным имитатором и блоком его охлаждения; фланца 8 с расположенными на нем портальными вводами для подключения вакуумного оборудования.

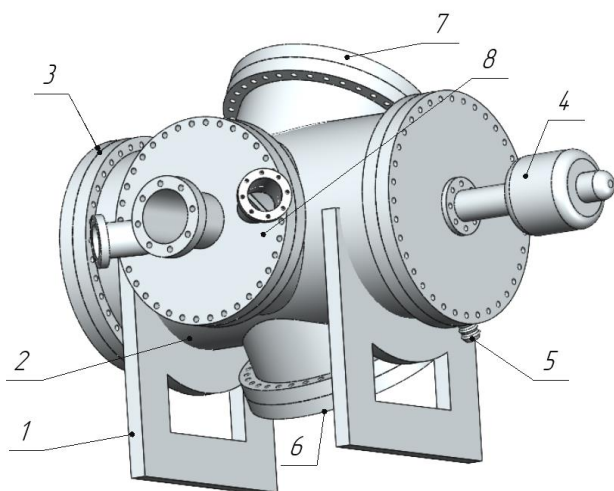


Рис. 1. Изображение тепловакуумной камеры, оборудованной имитатором солнечного света для испытаний МКА

Имитатор солнечного света 9 (рис. 2, а) располагается на верхнем фланце внутри вакуумной камеры и выполнен в виде набора полупроводниковых светоизлучающих диодов, контактирующих с внутренней плоскостью фланца для отвода выделяющегося тепла при их работе. Также для подключения светодиодов к их питанию в конструкции фланца присутствует электрический ввод 8, а для охлаждения снизу вне камеры – охлаждающий контур 13 (рис. 2, б).

Исследуемый спутник внутри камеры фиксируется в видоизменённом контейнере (рис. 3), который был ранее разработан и апробирован в НОЦ им. К.Э. Циолковского АмГУ. Данный контейнер жестко соединён с вводом вращения 4, который, в свою очередь, присоединён к торцевому фланцу. Так как стандартные вводы вращения не рассчитаны на высокие радиальные нагрузки, в конструкции присутствует промежуточный вал 12, установленный на опорные подшипники 11 (см. рис. 3).

Благодаря наличию ввода вращения возможно изменять ориентацию спутника, установленного в контейнере, относительно оси его вращения и солнечного имитатора (рис. 4).

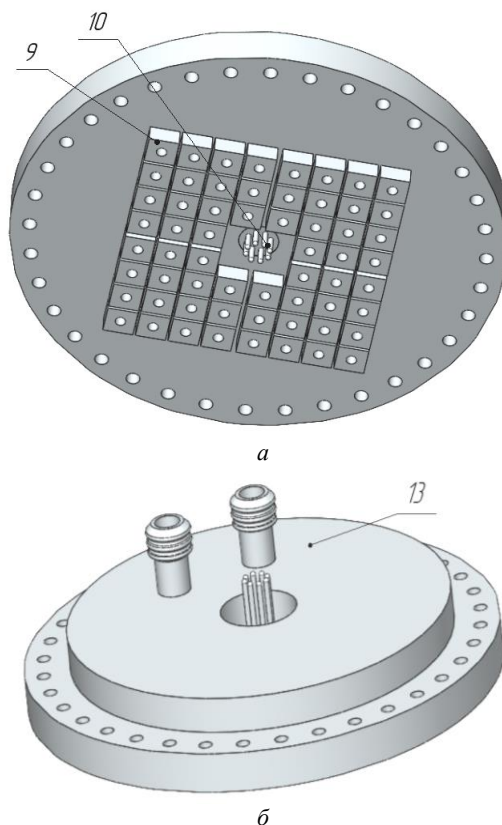


Рис. 2. Изображение фланца 7 с расположенными на нем: а – светодиодными лампами; б – охлаждающим контуром

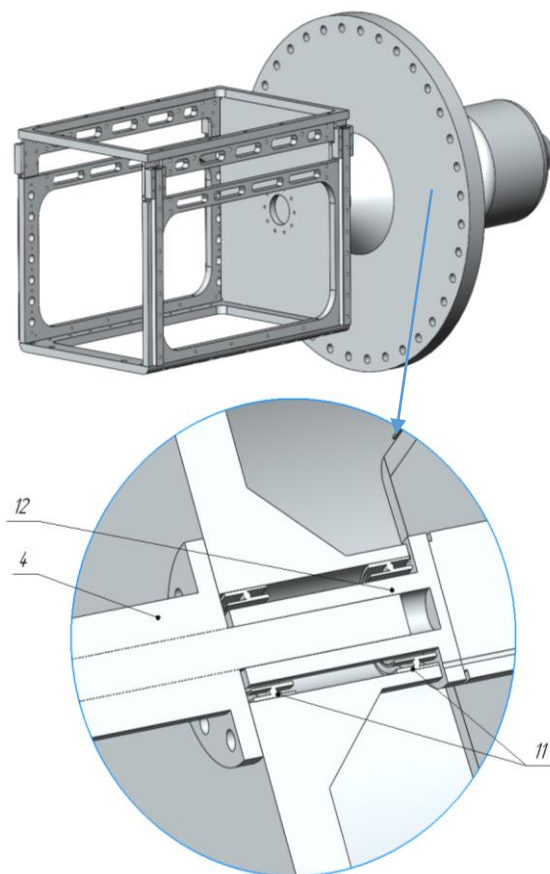


Рис. 3. Изображение торцевого фланца с установленным на нем контейнером для МКА

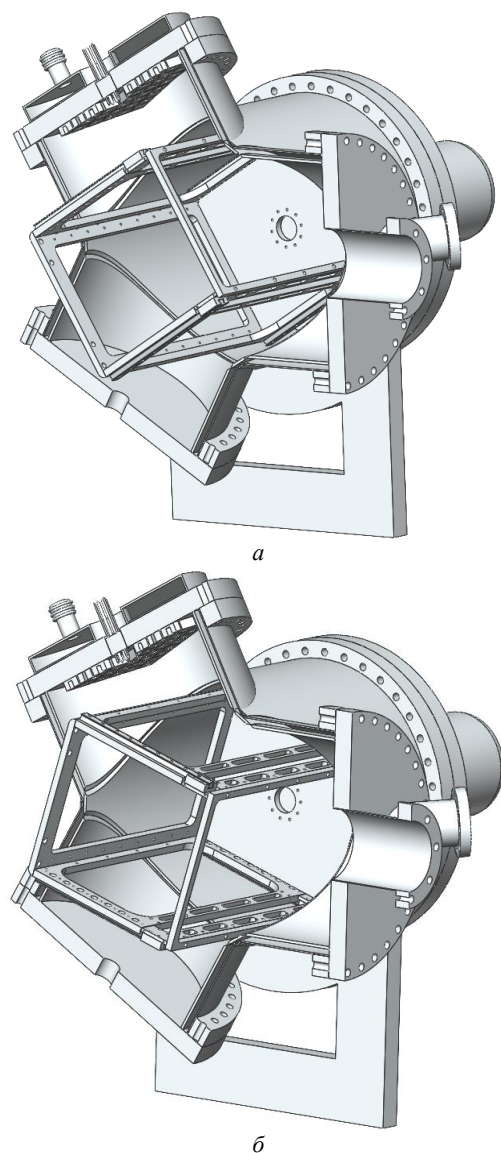


Рис. 4. Изображение тепловакуумной камеры в разрезе с установленным контейнером:
a – расположенным одной стороной параллельно солнечному имитатору; *б* – расположенным под углом относительно плоскости солнечного имитатора

Таким образом, в данной работе представлен результат проектирования тепловакуумной камеры для испытания МКА стандарта CubeSat, включающей в себя новый перспективный имитатор солнечного света, построенный на основе полупроводниковых излучающих диодов. Наличие в камере узла

вращения спутника позволяет симитировать изменения его ориентации относительно солнца на орбите и таким образом провести испытания спутника, наиболее приближенные к натурным.

Литература

1. Шевчук А.А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 672–686. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.
2. Современные и перспективные имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов / Р.О. Аслаян, Д.И. Анисимов, И.А. Марченко, В.И. Пантелеев // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 334–335.
3. Нестеров С.Б. Перспективные источники излучения для крупнобаритных имитаторов солнечного излучения / С.Б. Нестеров, А.А. Филатов // Вакуумная наука и техника: матер. XXVII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. – Крым, Судак, 14–19 сентября 2020 г. – М.: НОБЕЛЛА, 2020. – С. 196–199.
4. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата / Р.О. Аслаян, Д.И. Анисимов, И.А. Марченко, В.И. Пантелеев // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 323–327.
5. Патент № 2772156 С1. Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Стенд для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat с интерфейсом связи: № 2021117193: заявл. 15.06.2021: опубл. 18.05.2022 / Д.В. Фомин, А.А. Комарова; заявитель ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет».
6. Патент № 2812511 С1. Российская Федерация, МПК В64G 99/00, В64G 7/00, G01M 7/00. Имитатор транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 6U, предназначенный для использования в составе поворотных устройств. – № 2023118467: заявл. 13.07.2023: опубл. 30.01.2024 / Д.В. Фомин, А.Е. Голых; заявитель ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет».

Голых Артём Евгеньевич

Аспирант Амурского гос. ун-та (АмГУ)
Эл. почта: artemgolykh@gmail.com

Фомин Дмитрий Владимирович

Канд физ.-мат. наук, доцент,
зам. директора по науке и инновациям ИКиИН АмГУ
Эл. почта: e-office@yandex.ru

С.В. Поздняков, С.В. Макаров, М.А. Санджиева

Исследование динамики носителей заряда в тонких композитных пленках на основе квази-2Д перовскита $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$

Разработан одностадийный метод получения нанокompозитных пленок с применением свинцового металлоорганического каркаса в качестве прекурсора для получения квазидвумерного перовскита $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$. Были изучены морфология и оптические свойства тонких композитных пленок, а также детальное исследование динамики носителей зарядов для определения радиационных констант излучательной рекомбинации.

Ключевые слова: квазидвумерные перовскиты, композиты, гибридные перовскиты, металлоорганические каркасы, тонкие пленки.

Стремительный рост эффективности светоизлучающих диодов и солнечных элементов на основе гибридных перовскитов вывел их в ряд наиболее перспективных материалов для оптоэлектроники следующего поколения [1, 2]. Однако их широкое практическое применение ограничено низкой стабильностью ионной кристаллической решетки перовскита к воздействию влаги, кислорода, тепла и электрического поля, а также высокой плотностью дефектов на поверхности и границах зерен нанокристаллов [3]. На этом фоне среди многообразия их структурных типов особое внимание привлекают квазидвумерные (квази-2Д) перовскиты, которые образуются путем внедрения объемных органических катионов (например, бутиламмония или фенилэтиламмония) в трехмерную кристаллическую структуру перовскита ABX_3 , (например, для галогенидных свинцовых перовскитов $\text{A}^+ = \text{Cs}^+$, метиламмоний (MA^+); $\text{B} = \text{Pb}^{2+}$; $\text{X}^- = \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^-$). Этот процесс приводит к самопроизвольному формированию квантово-размерных слоистых структур, где слои перовскита разделены органическими прослойками [4]. Ключевым преимуществом таких систем являются значительное повышение энергии связи экситона, и, следовательно, большие величины квантового выхода фотолюминесценции (ФЛ) [5].

Однако таким структурам свойственна кристаллизация перовскита с различным количеством слоев (n), что приводит к формированию либо зеленой люминесценции [6], либо нескольких эмиссионных пиков [7]. Кроме того, фундаментальное понимание динамики носителей заряда – процессов генерации, разделения, переноса и рекомбинации – в этих сложных гетероструктурах остается неполным.

В частности, в тонких пленках, где сосуществуют фазы с различной размерностью перовскита (от $n = 1$ до $n = \infty$), кинетика носителей определяется целым каскадом межфазных процессов: туннелированием через органические барьеры, резонансным переносом энергии и конкуренцией между излучательной и безызлучательной рекомбинацией [8]. Стоит отметить, что методы получения высокостабильных квази-2Д перовскитов имеют некоторые недостатки, такие как сложный технологический процесс и жесткие кислотные условия реакции. Та-

ким образом, разработка удобного и экологичного метода получения стабильных и ярких квази-2Д перовскитов имеет важное значение. Кроме того, исследование композитных материалов на основе квази-2Д перовскитов представляет особый интерес именно в контексте преодоления «проблемы стабильности» перовскитов.

Представлены результаты по разработке и исследованию оптических свойств тонкопленочных композитов квазидвумерного перовскита на основе бутиламмония (BA) $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$ [$\text{BA}^+ = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{NH}_3^+$; $\text{MA} = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$] в матрице, полученной из свинцового металлоорганического каркаса (МОК) (далее по тексту $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}@\text{МОК}$). Исследование динамики носителей в композитных пленках квази-2Д перовскита является не только актуальной фундаментальной задачей, но и имеет важное значение для целенаправленной оптимизации материалов и оптоэлектронных устройств.

Экспериментальная часть

Для получения образцов использовались следующие реактивы: нитрат свинца ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 99,7%, ЛенРеактив), тримезиновая кислота (1,3,5-бензолтрикарбоновая кислота (H_3BTC) 95%, Sigma-Aldrich), метиламин (CH_3NH_2 , 38 мас.% Panreac), уксусная кислота (CH_3COOH , 93%, ECOS), диметилсульфоксид (ДМСО, 99%, ECOS), бромид *n*-бутил аммония (BABr , 98%, IQ Demi). Все реагенты использовались без дополнительной очистки.

Синтез композитного материала

Синтез свинцового МОК (Pb-МОК) осуществлялся сонохимическим методом [9]. Для проведения синтеза к 90 мл водному раствору H_3BTC (0,9 ммоль) прикапывали 10 мл водного раствора $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (0,9 ммоль) в ультразвуковой ванне. Образовавшийся осадок отделяли центрифугированием и промывали этанолом. Полученный порошок высушивали при температуре 60 °C в течение 8 ч.

Для приготовления тонких пленок композитного материала квази-2Д перовскита состава $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}@\text{МОК}$ различной толщины были использованы растворы Pb-МОК со следующими концентрациями: 100, 150, 200, 250 мг/мл, к которым добавляли 3,4 эквивалента BABr . В качестве растворителя использовали диметилсульфоксид (ДМСО) в объемах 360, 350, 340, 330 мкл соответ-

ственно. Дополнительно вводили ацетат метиламмония (МААс) в объемах 140, 150, 160, 170 мкл. Полученные смеси гомогенизировали с использованием лабораторного вихревого миксера MSV-3500 (BioSan) до полного растворения компонентов.

Получение тонких композитных пленок $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$ @МОК на стеклянных подложках осуществлялось методом центрифугирования из приготовленных растворов. Процесс проводили при скорости вращения 3000 об/мин в течение 90 с с последующим увеличением скорости до 5 000 об/мин на протяжении 10 с. Полученные образцы подвергали отжигу при температуре 60 °С в течение 10 мин.

Анализ размера наночастиц

Полученные пленки были исследованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для определения размеров частиц. Анализ распределения частиц по размерам (рис. 1), выполненный на выборке из 100 частиц, показал, что средний размер составляет 7,2 нм, при этом минимальный и максимальный размеры частиц составляют 3,7 и 12,3 нм соответственно.

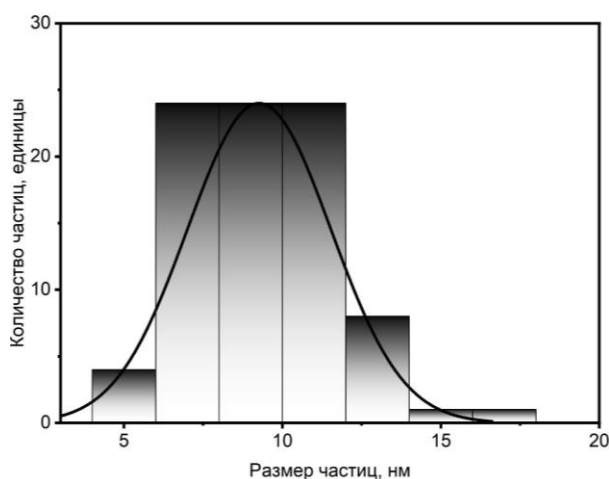


Рис. 1. Распределение размеров частиц $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$

Оптические свойства

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) полученных пленок (рис. 2) демонстрируют синее смещение положения пика ФЛ с 491,4 до 508,4 нм при уменьшении ширины на полувысоте с 50,5 до 24,8 нм для образцов, полученных из растворов с концентрацией Рb-МОК от 100 до 250 мг/мл.

На спектре поглощения для пленки (рис. 3), полученной из раствора концентрацией Рb-МОК 100 мг/мл, наблюдается отчетливо выраженный экситонный пик в области 490 нм, что свидетельствует о формировании хорошо определенных экситонных состояний. По мере увеличения концентрации Рb-МОК до 250 мг/мл экситонный пик смещается в сторону более длинных волн (красное смещение), что может указывать на увеличение размеров нанокристаллов и уменьшение квантово-размерных эффектов.

Такое поведение согласуется оптическими характеристиками квази-2Д перовскитов: по мере увеличения концентрации Рb-МОК пленки демонстрируют переход от квазидвумерной к трехмерной перовскитной фазе [10].

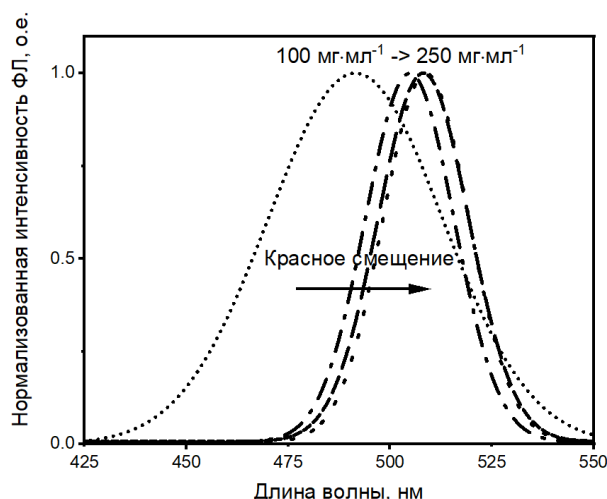


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции полученных пленок $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$

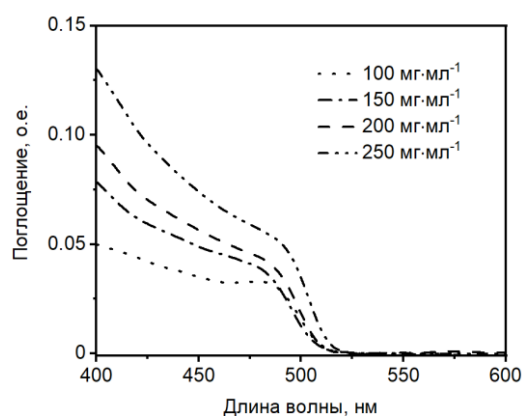


Рис. 3. Спектры поглощения полученных пленок

Измерения квантового выхода фотолюминесценции (КВФЛ) подтверждают наблюдаемую структурную эволюцию в пленках. КВФЛ увеличивается с 5,7% для пленок, полученных из раствора концентрацией 100 мг/мл, до 12,8% при 150 мг/мл и достигает максимума 36% при 200 мг/мл, после чего снижается до 28,9% при 250 мг/мл при плотности мощности 0,1 Вт·см⁻² (рис. 4).

Данное изменение КВФЛ можно объяснить доминированием нерадиационных каналов рекомбинаций в пленках с ярко выраженными квантово-размерными эффектами, где высокая поверхностная площадь и межфазные границы создают ловушки носителей зарядов, и последующим ростом вклада радиационной рекомбинации по мере перехода к трехмерной структуре перовскита [11]. На пленке с большей концентрацией Рb-МОК происходит деградация морфологии, вследствие чего растет дефектность, усиливающая нерадиационные процессы, и приводит к снижению квантового выхода.

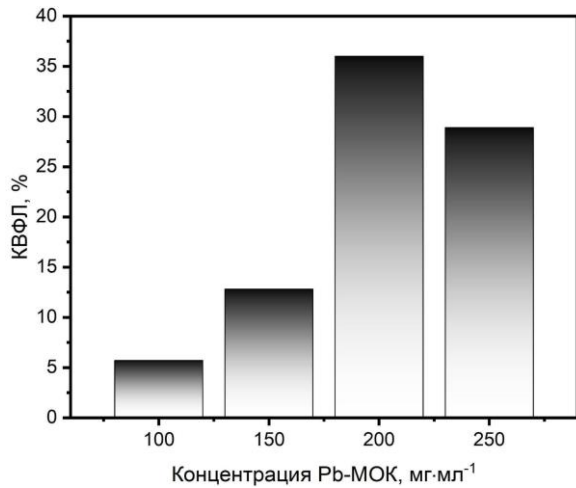


Рис. 4. Зависимость КВФЛ от концентрации Pb-МОК

Анализ динамики носителей зарядов

Для анализа динамики носителей заряда применяли метод временно разрешенной спектроскопии фотолюминесценции (ВСФЛ) с использованием фемтосекундного волоконного лазера Antaus Ytterbium ($\lambda = 343$ нм, частота повторения 10 кГц). Для детектирования сигналов был использован лавинный фотодиод одиночных фотонов (SPAD PDM, Micro Photon Devices). Регистрация стационарных спектров ФЛ осуществлялась с помощью волоконно-оптического спектрометра QE Pro.

Модифицированная модель ABC использовалась для аппроксимации кривых затухания ФЛ.

$$\frac{dn_{ex}}{dt} + \frac{dn_0}{dt} = -A_{ex}n_{ex} - B_{EEA}n_{ex}^2 - An_0 - Bn_0^2 - Cn_0^3. \quad (1)$$

Параметр A_{ex} описывает радиационную рекомбинацию, связанную с спонтанной рекомбинацией экситонов, B_{EEA} – экситон-экситонную рекомбинацию, соответствующую Оже-рекомбинации экситонов. Коэффициент A характеризует рекомбинацию с участием ловушек, B – бимолекулярную радиационную рекомбинацию, а C – Оже-рекомбинацию [12].

При относительно низкой плотности энергии накачки вклад Оже-рекомбинации в общую рекомбинацию носителей заряда несуществен [12]. Соответственно, нормализованная кривая затухания ФЛ может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$N = \frac{An_0 \exp(-At)}{A + Bn_0(1 - \exp(-At))} + \frac{A_{ex}n_{ex} \exp(-A_{ex}t)}{A_{ex} + B_{EEA}n_{ex}(1 - \exp(-A_{ex}t))} + \text{const}, \quad (2)$$

где N – общая концентрация экситонов и носителей заряда, n_0 – начальная концентрация носителей заряда, а n_{ex} – начальная концентрация экситонов.

Для подтверждения одновременного вклада экситонной и носитель-зависимой рекомбинации была исследована зависимость интенсивности ФЛ от плотности энергии накачки. Полученный коэффициент наклона $K = 1,06$ (рис. 5) указывает на смешанный характер процессов, включающий как экситон-

ную рекомбинацию, так и рекомбинацию свободных носителей заряда [13].

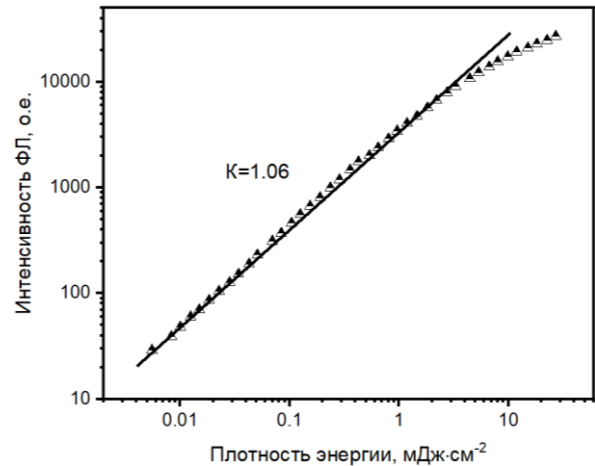


Рис. 5. Зависимость интенсивности ФЛ от плотности энергии накачки

По результатам анализа кривых затухания ФЛ пленки, полученной из раствора с концентрацией 200 мг/мл (рис. 6), получены изменения рекомбинационных коэффициентов (таблица). По мере увеличения плотности энергии накачки с $F = 7,4$ до $17,0$ мДж·см⁻² происходит уменьшение вклада радиационной компоненты экситонной рекомбинации, при этом увеличивается коэффициент, отвечающий за экситон-экситонную аннигиляцию, что позволяет утверждать о разрушении экситонной связи и увеличении количества свободных носителей заряда. Также, исходя из роста коэффициента, отвечающего за мономолекулярную рекомбинацию, с $6,2 \cdot 10^7$ с⁻¹ до $10,3 \cdot 10^7$ с⁻¹ и роста значений $B \cdot n_0$ с $5,4 \cdot 10^7$ с⁻¹ до $28,7 \cdot 10^7$ с⁻¹ можно подтвердить процесс распада экситонов на свободные носители заряда, подкрепляя вышеизложенные физические процессы.

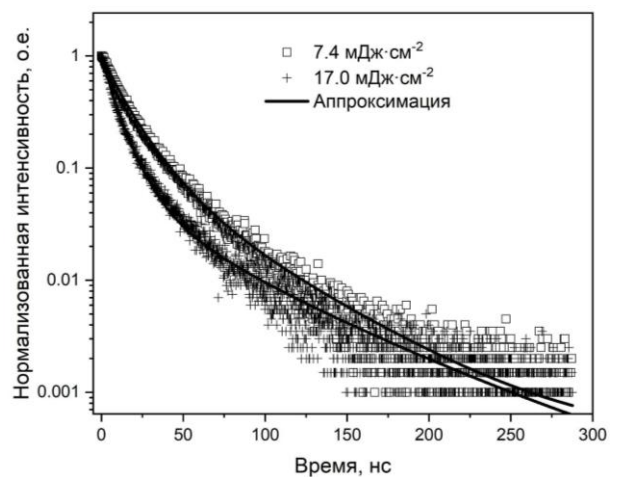


Рис. 6. Зависимости кривых затуханий ФЛ от плотности энергии накачки

Анализ кривых затухания пленки $BA_2MA_{x-1}Pb_xBr_{3x+1}$

F , мДж·см ⁻²	A , с ⁻¹	A_{ex} , с ⁻¹	$B \cdot n_0$, с ⁻¹	$B_{EEA} \cdot n_{ex}$, с ⁻¹
7,4	$6,2 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$
17,0	$10,3 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$28,7 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^7$

Обсуждение

Совокупный анализ оптических характеристик композитных пленок состава $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$ @МОК продемонстрировал эволюцию механизмов излучения при изменении структуры и условий оптического возбуждения. Спектры ФЛ демонстрируют сдвиг пика из области синего смещения в область больших длин волн по мере увеличения концентрации Рb-МОК, что указывает на переход от квази-2Д к более трехмерной перовскитной фазе, сопровождаемый ослаблением экситонных связей. Одновременно наблюдается рост квантового выхода ФЛ с 5,7 до 36% (200 мг/мл), что связано с увеличением доли радиационной рекомбинации.

Последующее увеличение концентрации Рb-МОК приводит к снижению квантового выхода ФЛ, что связано с образованием дефектных уровней. Данные временно разрешенной фотолюминесценции показывают, что при увеличении плотности энергии накачки вклад радиационной экситонной рекомбинации снижается, тогда как коэффициенты мономолекулярной, бимолекулярной и экситон-экситонной аннигиляции возрастают. Это указывает на распад экситонов и рост доли свободных носителей, что согласуется с наблюдаемым переходом к трёхмерной перовскитной фазе и увеличением подвижности заряда.

Заключение

Таким образом, изменение оптических свойств, квантового выхода и динамики рекомбинации отражает структурно-индуцированный переход от экситонного к носитель-зависимому механизму излучения, определяющему эффективность и стабильность полученных плёнок. Установленные закономерности указывают на возможность целенаправленного управления радиационными процессами в гибридных перовскитах, что делает данные материалы перспективными для применения в оптоэлектронных устройствах, в частности светоизлучающих диодах и лазерах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-73-20189-П).

Литература

1. Gao Y. et al. Microsecond-response perovskite light-emitting diodes for active-matrix displays // *Nature Electronics*. – 2024. – Vol. 7. – P. 487–496.
2. Liu S. et al. Buried interface molecular hybrid for inverted perovskite solar cells // *Nature*. – 2024. – Vol. 632. – P. 536–542.
3. Leguy A.M. et al. Reversible Hydration of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ in Films, Single Crystals, and Solar Cells // *Chemistry of Materials*. – 2015. – E27, No. 9. – P. 3397–3407.

4. Mitzi D.B. et al. Conducting tin halides with a layered organic-based perovskite structure // *Nature*. – 1994. – Vol. 369. – P. 467–469.

5. Zhao Z. et al. Photomultiplication type organic photo-detectors based on electron tunneling injection // *Nanoscale*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1091–1099.

6. Shang Y. et al. Quasi-2D Inorganic CsPbBr_3 Perovskite for Efficient and Stable Light-Emitting Diodes // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol. 28, No. 22. – P. 1801193.

7. Chen Z. et al. High-performance color-tunable perovskite light emitting devices through structural modulation from bulk to layered film // *Advanced Materials*. – 2017. – Vol. 29, No. 8. – P. 1603157.

8. Yuan M. et al. Perovskite energy funnels for efficient light-emitting diodes // *Nature Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 11. – P. 872–877.

9. Sadeghzadeh H. Sonochemical synthesis and structural characterization of a nano-structure Pb (II) benzenetricarboxylate coordination polymer: new precursor to pure phase nanoparticles of Pb (II) oxide / H. Sadeghzadeh, A. Morsali // *Journal of Coordination Chemistry*. – 2010. – Vol. 63, No. 4. – P. 713–720.

10. Wang Z. et al. Dimension tailoring of quasi-2D perovskite films based on atmosphere control toward enhanced amplified spontaneous emission // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, No. 19. – P. 4628.

11. K. Ma. Advances and challenges in molecular engineering of 2D/3D perovskite heterostructures / K. Ma, J. Sun, L. Dou // *Chemical Communications*. – 2024. – Vol. 60, No. 61. – P. 7824–7842.

12. Khmelevskaia D. et al. Excitonic versus free-carrier contributions to the nonlinearly excited photoluminescence in CsPbBr_3 perovskites // *ACS Photonics*. – 2022. – Vol. 9, No. 1. – P. 179–189.

13. Richter J.M. et al. Enhancing photoluminescence yields in lead halide perovskites by photon recycling and light out-coupling // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7, No. 1. – P. 13941.

Поздняков Степан Васильевич

Аспирант физико-технического мегафакультета
Университета ИТМО

Эл. почта: stepan.pozdnyakov@metalab.ifmo.ru

Макаров Сергей Владимирович

Д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. Университета ИТМО

Эл. почта: s.makarov@metalab.ifmo.ru

Санджиева Мария Алексеевна

Канд. хим. наук, н.с. Университета ИТМО

Эл. почта: maria.sandzhieva@itmo.ru

Д.А. Алмаев, В.В. Копьев, А.В. Цымбалов

Влияние межэлектродного расстояния на фотоэлектрические характеристики фотоприемников на основе оксида галлия

Пленки оксида галлия были получены методом ВЧ-магнетронного распыления на сапфировых подложках. После отжига при температуре 900 °С в потоке аргона в течение 30 мин пленки Ga_2O_3 образуют поликристаллическую β -фазу с высокой стехиометрией. Толщина пленок составила 270 нм. Значения оптической ширины запрещенной зоны для пленок β - Ga_2O_3 увеличились с 4,71 до 4,87 эВ при снижении температуры с 400 до 10 К. На вольт-амперных характеристиках наблюдается участок насыщения, связанный с дрейфовой скоростью, а положение участка определяется длиной свободного пробега. Максимальные значения токовой монохроматической чувствительности образцов с межэлектродным расстоянием 20 и 30 мкм составили 0,53 и 0,54 А/Вт соответственно.

Ключевые слова: Ga_2O_3 , фотоприемник, межэлектродное расстояние, фототок, длина свободного пробега.

Оксид галлия (Ga_2O_3) является ультраширокозонным полупроводником n -типа проводимости с шириной запрещенной зоны $E_g = 4,4\text{--}5,3$ эВ [1]. Данный материал демонстрирует полиморфизм и может существовать в пяти кристаллических модификациях: α , β , γ , δ и $\epsilon(\kappa)$ [2]. Среди полиморфных модификаций выделяется β -фаза с моноклинной структурой. β - Ga_2O_3 характеризуется высокой химической и термической стабильностью [3].

Наиболее актуальным направлением исследований является разработка солнечно-слепых ультрафиолетовых (УФ) фотоприемников [1–4]. Такие фотоприемники могут быть использованы для обнаружения пламени, мониторинга озоновых дыр, биологического и химического анализа, навигации и оптической связи.

Низкотемпературные исследования материалов на основе Ga_2O_3 направлены на выявление и характеристику дефектов, но они не учитывают их чувствительность к УФ-излучению [5]. Исследование фотоэлектрических характеристик фотоприемников на основе Ga_2O_3 в основном проводятся при комнатной температуре и выше [6]. Исследование низкотемпературного изменения фотоэлектрических характеристик в широком диапазоне напряжений является важным инструментом для выявления механизмов переноса заряда, анализа влияния ловушек и дефектов, оценки стабильности и надежности устройств. В связи с этим данная работа посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик структур на основе Ga_2O_3 с разным межэлектродным расстоянием в широком диапазоне температур.

Методика исследования

Пленки Ga_2O_3 были получены методом ВЧ-магнетронного распыления мишени Ga_2O_3 (99,999%) на гладкие сапфировые подложки на установке AUTO-500 (Edwards) в газовой смеси Ar/O_2 . Время напыления пленок составляло 40 мин. Концентрация кислорода в смеси поддерживалась на уровне $56,1 \pm 0,5$ об.%. Подложка находилась на расстоянии 70 мм от мишени. Давление в камере составляло 7×10^{-6} бар. Преднамеренного легирования пленок в процессе роста не проводилось. Отжиг проведен в

потоке аргона при температуре 900 °С в течение 30 мин. Для измерения фотоэлектрических характеристик на поверхности пленок Ga_2O_3 формировались Pt-контакты со встречно-штыревой топологией с межэлектродным расстоянием $l = 20$ и 30 мкм. Сапфировые пластины с пленкой Ga_2O_3 и Pt-контактами были разрезаны на отдельные образцы размером $1,0 \times 0,5$ см².

Фазовый состав плёнок был определен методом рентгенодифракционного анализа (РДА). Морфология поверхности пленок была исследована с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Элементный состав пленок исследован методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Для измерения спектров оптического пропускания были использованы дейтериевая лампа D-2000 Micropack и спектрометр Ocean Optics Flame.

При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) был использован источник-измеритель Keithley 2636A. В качестве источника монохроматического ($\lambda = 254$ нм) излучения была использована криптон-фторовая лампа с плотностью потока излучения 230 мкВт/см². Расчет фотоэлектрических характеристик проводился по общепринятым формулам, используемым в литературе [1, 3, 4]. Быстродействие фотоприемников измерено с помощью цифрового осциллографа Tektronix 104XS с полосой пропускания 1 ГГц и УФ-светодиода с максимумом спектральной характеристики на $\lambda = 255$ нм. Время нарастания t_r и спада фототока t_f определяли по уровням 0,1–0,9. Низкотемпературные измерения проведены в оптическом криостате Janis CCS-300S/204 НТ с терморегулятором Lake Shore Model 331. Диапазон температур T составлял 10–400 К с точностью измерения 0,01 К.

Результаты и обсуждение

На дифрактограммах пленок Ga_2O_3 присутствует множество пиков, соответствующих отражениям от плоскостей (–201), (–311), (–112), (–603), (–221) и (–514), которые относятся к β -фазе (ICDD #00-041-1103). Пленки β - Ga_2O_3 являются поликристаллическими с размером кристаллитов 8,9 нм.

Поверхность пленки состоит из неоднородных зерен со средним размером 8 нм и высотой 19 нм. Среднеквадратичная шероховатость поверхности пленки составляет 4,46 нм. Результаты исследований методом ЭДРС показали, что пленки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ обладают высокой стехиометрией. Соотношение атомов кислорода к галлию $[\text{O}]/[\text{Ga}]$ составляет 1,48, и никаких посторонних включений обнаружено не было.

Толщина пленки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ была определена из анализа спектра пропускания и составила 270 ± 10 нм. Для определения значения оптической ширины запрещенной зоны E_g^{opt} была исследована зависимость α от энергии фотона $h\nu$. Более точно данная зависимость аппроксимируется в координатах $(\alpha h\nu)^2$ от $h\nu$, что свидетельствует о прямых оптических переходах. Значения E_g^{opt} для пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ увеличились с 4,71 до 4,87 эВ при снижении температуры с 400 до 10 К, что согласуется с расчетными данными (рис. 1).

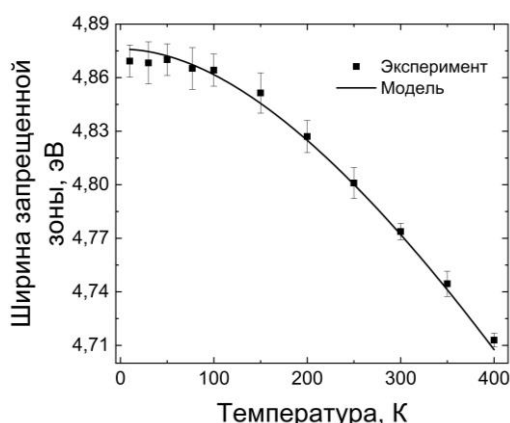


Рис. 1. Температурная зависимость оптической ширины запрещенной зоны пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

ВАХ структур $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с $l = 20$ и 30 мкм, измеренные при воздействии УФ-излучением (рис. 2), являются симметричными относительно полярности приложенного напряжения. При высоких напряжениях наблюдается участок насыщения тока, который с повышением температуры расширяется в сторону меньших значений U . Рост температуры образца с $l = 20$ мкм приводит к понижению напряжения насыщения со 136 до 64 В, а с $l = 30$ мкм – со 178 до 94 В, что соответствует напряженности электрического поля в фотоприемнике. Участки насыщения тока на ВАХ, вероятно, связаны с насыщением дрейфовой скорости электронов. Смещение участка насыщения в сторону меньших напряжений с повышением температуры может быть связано с уменьшением длины свободного пробега электронов. При высокой напряженности электрического поля электроны двигаются с максимальной скоростью, но проходят меньшее расстояние, поэтому равновесие между фотогенерированными и способными дать вклад в фототок носителями заряда устанавливается раньше.

До $T = 150$ К для образца с $l = 20$ мкм и до $T = 200$ К для образца с $l = 30$ мкм зависимость тока от напряжения имеет сложный степенной вид $I \sim U^m$,

где m – показатель степени. Наблюдается несколько участков с разными значениями m больше 1, что указывает на смену механизма фотопроводимости. Для детального анализа механизма проводимости требуется рассматривать ВАХ в темновых условиях, но значения темного тока находятся в нижнем пределе измерительного оборудования (< 1 пА), что ограничивает анализ данных результатов. При температуре более 150 К наблюдаются изменения вида ВАХ, значения m стремятся к 1, а ток практически не зависит от температуры.

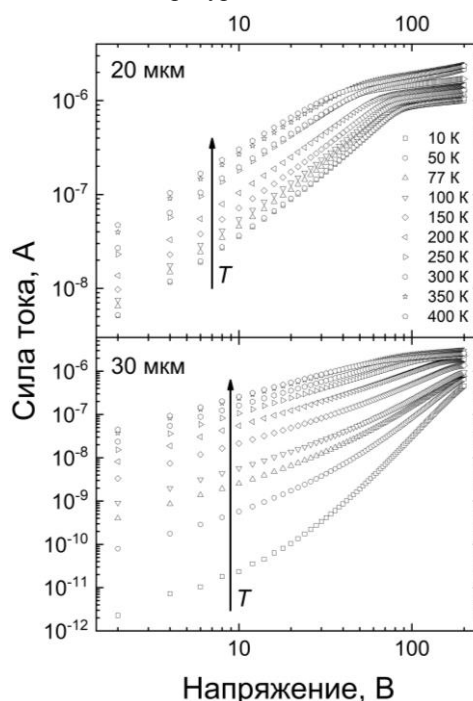


Рис. 2. ВАХ структур $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ при облучении светом с $\lambda = 254$ нм для разных температур

Из анализа ВАХ была получена температурная зависимость токовой монохроматической чувствительности R_λ для разных напряжений (рис. 3), которые соответствуют одинаковым напряженностям электрического поля между контактами на образцах с разным межэлектродным расстоянием. Данные зависимости имеют качественно похожий вид, значения R_λ увеличиваются с ростом напряжения и почти совпадают для структур с разными значениями l .

Температурный максимум значений R_λ соответствует $T \approx 400$ К, который с повышением напряженности электрического поля смещается до $T \approx 350$ К. Стоит отметить, что температурный сдвиг для образцов с разными значениями l немного отличается. Для $l = 20$ мкм максимальным значениям R_λ соответствуют большие температуры. Это может быть связано с временем пролета электронов между контактами.

Носители заряда в двух образцах имеют одинаковую скорость дрейфа, но для вклада в фототок они должны пройти разное расстояние. Как уже отмечалось, рост температуры приводит к снижению длины свободного пробега, поэтому вклад в фототок

даст меньше носителей заряда. В результате значения R_L начинают снижаться, что приводит к появлению максимума на кривой, положение которого будет определяться межэлектродным расстоянием.

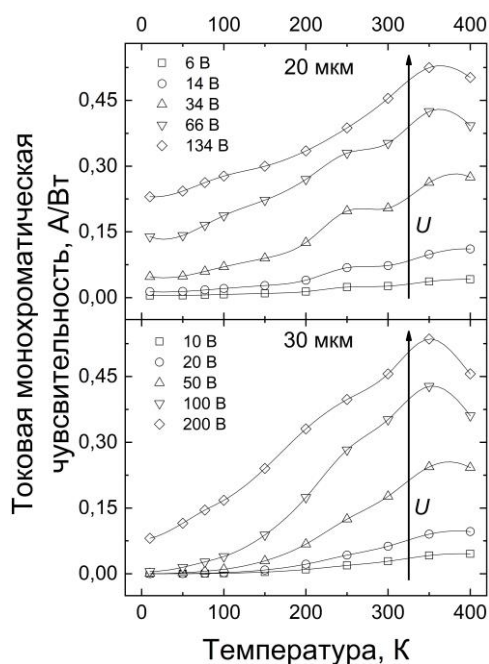


Рис. 3. Температурная зависимость токовой монохроматической чувствительности структур Pt/ β -Ga₂O₃ для разных напряжений

Заключение

Пленки β -Ga₂O₃ толщиной 270 нм были получены методом RFMS на сапфировых подложках. После отжига в потоке аргона пленки образуют поликристаллическую β -фазу с высокой стехиометрией. На ВАХ наблюдается участок насыщения, связанный с дрейфовой скоростью, а положение участка определяется длиной свободного пробега. Максимальные значения R_L образцов с межэлектродным расстоянием 20 и 30 мкм соответствует температуре 350 К и напряженности электрического поля 67 кВ/см. Положение максимума значений R_L определяется временем пролета между контактами.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030), проект № 2.5.4.25 МЛ.

Литература

1. Review of polymorphous Ga₂O₃ materials and their solar-blind photodetector applications / X. Hou, Y. Zou, M. Ding, Y. Qin, Z. Zhang, X. Ma, P. Tan, S. Yu, X. Zhou, X. Zhao, G. Xu, H. Sun, S. Long // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021. – Vol. 54, No. 4. – P. 043001.
2. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices / S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro // Appl. Phys. Rev. – 2018. – Vol. 5, No. 1. – P. 011301.
3. Kaur D. A strategic review on gallium oxide based deep-ultraviolet photodetectors: Recent progress and future prospects / D. Kaur, M. Kumar // Adv. Opt. Mater. – 2021. – Vol. 9, No. 9. – P. 2002160.
4. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors / X. Chen, F. Ren, S. Gu, J. Ye // Photon. Res. – 2019. – Vol. 7, No. 4. – P. 381–415.
5. Huge photosensitivity gain combined with long photocurrent decay times in various polymorphs of Ga₂O₃: effects of carrier trapping with deep centers / A.Y. Polyakov, E.B. Yakimov, I.V. Shchemerov, A.A. Vasilev, A.I. Kochkova, V.I. Nikolaev, S.J. Pearton // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2024. – Vol. 58, No. 6. – P. 063002.
6. High-temperature photocurrent mechanism of β -Ga₂O₃ based metal-semiconductor-metal solar-blind photodetectors / B.R. Tak, M. Garg, S. Dewan, C.G. Torres-Castanedo, K.-H. Li, V. Gupta, X. Li, R. Singh // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 125, No. 14. – P. 144501.

Алмаев Дмитрий Александрович

Аспирант радиофизического факультета Томского государственного университета (ТГУ), преп. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: almaev001@mail.ru

Копьев Виктор Васильевич

Канд. физ.-мат. наук, с.н.с. лаб. микроэлектроники мультиспектральной квантовой интроскопии ТГУ
Эл. почта: viktor.kopev@gmail.com

Цымбалов Александр Вячеславович

Канд. физ.-мат. наук, н.с. лаб. микроэлектроники мультиспектральной квантовой ТГУ
Эл. почта: zoldmine@gmail.com

И.А. Благих, К.Д. Франк, Д.А. Жаворонков

Обзор люминофорных композиций для аэрозольного нанесения на светодиодные чипы

Рассматриваются люминофорные композиции для применения на светодиодные чипы с использованием аэрозольного метода нанесения. Проанализированы преимущества данного подхода по сравнению с традиционными методами нанесения люминофоров, включая повышение точности дозирования, равномерности покрытия и возможности создания сложных пространственных структур. Представлены результаты литературного обзора жидких люминофорных композиций.

Ключевые слова: аэрозольное нанесение, люминофор, светодиодный чип, светотехнические характеристики, цветовая температура, индекс цветопередачи, аддитивные технологии.

Современное развитие светодиодной технологии неразрывно связано с совершенствованием методов нанесения люминофорных композиций, которые определяют основные светотехнические характеристики белых светодиодов.

Традиционные методы нанесения люминофоров, такие как центрифугирование, диспенсирование или трафаретная печать, имеют ряд ограничений, включая неравномерность толщины слоя, сложность контроля пространственного распределения и ограничения в создании градиентных структур [1, 2].

Аэрозольное нанесение

Рассматривается технология с использованием аэрозольного нанесения жидких люминофорных композиций на светодиодные чипы. Данный подход позволяет прецизионно контролировать толщину, форму и пространственное распределение люминофорного слоя, что открывает новые возможности для оптимизации светотехнических характеристик светодиодных устройств.

Повышение эффективности светодиодных источников света является одной из ключевых задач современной светотехники. По данным исследований, до 22% всей вырабатываемой электрической энергии расходуется на цели освещения [3]. Одним из направлений повышения эффективности является совершенствование технологии нанесения люминофорных композиций, которые преобразуют излучение синего светодиодного чипа в белый свет.

Традиционные методы нанесения люминофора на LED-чипы имеют следующие недостатки:

- неравномерность толщины слоя, приводящая к неоднородности цветовых характеристик,
- ограниченная возможность создания сложных пространственных структур люминофора,
- сложность контроля точности дозирования композиции,
- высокий процент брака при серийном производстве [4, 5].

Применение устройства с аэрозольным методом нанесения позволяет преодолеть эти ограничения и обеспечить:

- высокую точность нанесения люминофорной композиции с разрешением до 10 мкм,
- оптимизацию толщины слоя в зависимости от пространственного положения на чипе,
- снижение расхода люминофорной композиции до 30%,
- повышение воспроизводимости результатов при серийном производстве [6, 7].

Люминофорные материалы

Для реализации технологии аэрозольного нанесения люминофорных композиций на светодиодные чипы критически важен выбор подходящих люминофорных материалов, которые обеспечат требуемые цветовые характеристики, стабильность параметров и технологичность процесса. В таблице представлены основные типы люминофоров, применяемых в светодиодной промышленности, с указанием их химического состава, цвета свечения, типичного размера частиц и особенностей применения.

Люминофорные материалы для аэрозольного нанесения

Вещество (химический состав)	Цвет свечения	Примерный размер частиц	Особенности и применение
YGdSiO ₅ :Ce ³⁺	Желтый	10–20 мкм	Классический люминофор для белых светодиодов, возбуждаемый синим чипом
Силикатный светодиодный люминофор MSE PRO (SrBaMg) 2SiO ₄ : Eu ²⁺	Зелёный, жёлтый, оранжевый	10–20 мкм	Хорошая стабильность, подходит для белых светодиодов с высоким индексом цветопередачи
Красный нитридный фосфорический порошок PM2852	Красный	13±2 мкм	Высокая стабильность, используется в комбинации с желтым для CRI > 95
Желто-силикатный светодиодный люминофорный порошок PM2866	Желтый	15±2 мкм	Термостабильность, высокая износостойкость, подходит для светодиодов

Наиболее перспективными для данной цели представляются неорганические силикатные (например, легированные церием иттрий-гадолиниевые силикаты желтого свечения $\text{YGdSiO}_5\text{:Ce}^{3+}$) и нитридные люминофоры (такие, как β -сиалион: Eu^{2+}). Их преимущество перед традиционными алюмоиттриевыми гранатами (YAG:Ce) заключается в сферической или близкой к сферической морфологии частиц, получаемой в процессе синтеза. Сферическая форма минимизирует агрегацию, способствуя созданию стабильной, не подверженной седиментации суспензии с низкой вязкостью, что критически важно для формирования мелкодисперсного аэрозоля и осаждения однородного по толщине и плотности слоя. Кроме того, эти материалы демонстрируют высокую химическую инертность и стабильность к воздействию растворителей, что исключает деградацию их люминесцентных свойств в процессе приготовления и распыления суспензии.

Для преобразования сухого люминофорного порошка в жидкую форму, пригодную для аэрозольного нанесения на светодиодные чипы, необходимо создать стабильную суспензию с контролируемыми реологическими свойствами. Основой смеси служит люминофорный порошок (например, YAG:Ce или силикатный состав с размером частиц ≤ 20 мкм), который диспергируется в связующем веществе — чаще всего силиконовой смоле (Dow Corning OE-6630 или Momentive RTV-615), обеспечивающей термостойкость, адгезию к поверхности чипа и прозрачность для излучения.

Для регулировки вязкости и предотвращения расслоения можно использовать растворители (ксилол или ацетон в концентрации 10–20%) и диспергаторы (ВУК-111 или Tego Dispers 750 W, 0,5–1% от массы), которые разрушают агломераты частиц и стабилизируют суспензию. Ключевым этапом является обработка смеси ультразвуковой ванной (15–20 мин), что гарантирует однородность и отсутствие осадка.

Для повышения устойчивости системы можно применить загустители (гидрофобный аэросил, 0,1–0,5%). Готовая суспензия должна иметь вязкость 20–50 сПз, что оптимально для распыления устройством, а после нанесения отверждаться при 120–150 °С, образуя равномерное покрытие с высокой световой отдачей. Данный подход позволит адаптировать порошковые люминофоры для аэрозольного метода нанесения, сохраняя их оптические характеристики.

Теоретическая модель процесса нанесения люминофоров в виде аэрозоля

Идеальный процесс нанесения начинается с подготовки суспензии, где частицы люминофора рассматриваются как монодисперсные сферы, находящиеся в термодинамическом равновесии с диспергирующей средой благодаря идеально подобранным диспергантам, предотвращающим любую агломерацию по механизму DLVO-теории. На этапе аэрозольной ультразвуковой генерации жидкость разбивается на капли, размер которых строго опре-

деляется балансом сил поверхностного натяжения и внешнего воздействия (закон Рэлея). В идеале все капли имеют одинаковый размер и несут идентичное количество частиц люминофора. При осаждении на подложку, которая предварительно нагрета до температуры, превышающей точку кипения растворителя, происходит мгновенное испарение растворителя из каждой капли. Это предотвращает растекание капли, так как частицы фиксируются на месте до того, как успеют мигрировать к краям. В результате формируется сверхтонкий, механически стабильный и оптически однородный слой.

Принцип работы устройства для аэрозольного нанесения заключается в следующем: жидкая люминофорная композиция подается в ультразвуковой распылитель, где преобразуется в аэрозоль. Аэрозоль через систему подачи направляется к соплу, которое перемещается над поверхностью светодиодного чипа по заданной траектории [7].

Заключение

Применение жидких люминофоров в технологии производства светодиодов представляет собой качественный скачок от эмпирических методов к прецизионному, контролируемому инжинирингу конверсионного слоя. В отличие от традиционной технологии инкапсуляции, где люминофор статично закреплен в объеме полимерной матрицы, жидкие суспензии открывают путь к созданию тонкопленочных, градиентных и пространственно-селективных покрытий. Это позволяет не просто преобразовать спектр излучения, а оптимально управлять им, минимизируя световые потери, точно настраивая цветовые характеристики и решая проблему неравномерности свечения.

Ключевыми преимуществами данного подхода являются возможность локального нанесения непосредственно на чип, что обеспечивает превосходную теплопередачу и стабильность цветовой температуры, а также перспектива полной автоматизации процесса с использованием метода аэрозольного нанесения. Однако широкое внедрение технологии сдерживается необходимостью решения фундаментальных задач: обеспечения долговременной стабильности коллоидных суспензий, предотвращения агломерации частиц и разработки эффективных низкотемпературных связующих.

Авторы выражают глубокую признательность научному руководителю проекта профессору, доктору технических наук Василию Ивановичу Туеву за инициирование работы и общее руководство исследованиями в области аэрозольного нанесения люминофоров для светотехнической промышленности.

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/slm-printing-aviation-faq/>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).
2. Солдаткин В.С. Светодиоды и светодиодные устройства: учеб. пособие / В.С. Солдаткин, А.А. Вили-

сов, В.И. Туев. – Томск: ТУСУР, 2016. – 40 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5954/download>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).

3. Туев В.И. Современные проблемы светодиодных технологий и светотехнических устройств: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2017. – 136 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6713/download>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).

4. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: учеб. пособие / В.С. Солдаткин, А.А. Вилисов, В.И. Туев, Д.Г. Старосек. – Томск: ТУСУР, 2016. – 47 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6600/download>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).

5. Туев В.И. Управление в светотехнических системах: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2018. – 63 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7938/download>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).

6. Туев В.И. Проектирование светодиодных и светотехнических устройств: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2018. – 55 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7937/download>, свободный (дата обращения: 16.09.2025).

7. Жаворонков Д.А. Аэрозольное нанесение токопроводящих материалов как технология изготовления печат-

ных плат для светового оборудования // XIV молодежный форум «Образование. Наука. Производство». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – Ч. 12. – 193 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vk.com/doc202063564_649534314?hash=aK6Z5BbbyXuKD5mMbx8lwFQWl8KHeQYBuwnHqOorors&dl=qI8z6TN83wFqwjaMAYkiNToj204gB7g66T6KzmW9tH, свободный (дата обращения: 18.09.2025).

Благих Илья Андреевич

Студент каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: ilya.blagikh@yandex.ru

Франк Константин Денисович

Студент каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУРа
Эл. почта: frankkosta75@gmail.com

Жаворонков Дмитрий Александрович

Ассистент каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: zhavoronkov20012001@bk.ru

А.Э. Грицай, Р.Э. Грицай, Д.О. Петров, И.Ф. Гарипов

Проведение испытаний миниатюрных полупроводниковых ламп в высокотемпературных режимах

Приводятся результаты исследования характеристик малогабаритных светодиодных ламп. Применение разработанной кассеты позволило провести испытания индикаторных сверхминиатюрных ламп по определению конструкторско-технологического запаса и исследовать деградацию их параметров и конструкции.

Ключевые слова: полупроводниковые лампы, испытания, испытательная оснастка, конструкторско-технологический запас.

На текущий момент в полупроводниковой промышленности бурно развивается производство различных приборов и устройств. Не является исключением и полупроводниковая светотехника. В последнее время полупроводниковые лампы активно заменяют своих предшественников – лампы накаливания и люминесцентные лампы. Преимущества полупроводниковых ламп очевидны, а именно: лучшие световые и спектральные характеристики, лучшие показатели энергосбережения, уменьшение габаритных размеров, повышенная надежность и долговечность [1, 2].

Вместе с тем встает вопрос определения конструкторско-технологических запасов (далее – КТЗ) полупроводниковых ламп, проведения испытаний на безотказность и, как следствие, возможности расчета срока службы, надежности и коэффициента форсирования и определения режимов ускоренных испытаний и режимов термотокерной тренировки [3].

Представленная работа посвящена вопросу определения параметров надежности и конструкторско-технологического запаса (КТЗ) миниатюрных полупроводниковых источников света. Существующие методы ускоренных испытаний требуют применения специализированной оснастки, способной функционировать в высокотемпературных режимах. Целью данного исследования было проведение испытаний по определению КТЗ полупроводниковых ламп типа ЛСМ8 (аналог лампы накаливания СМН-8) производства АО «НИИПП» (г. Томск).

Методом ступенчато-повышающего напряжения проведены испытания партии из 10 образцов. Напряжение питания ступенчато повышалось от номинального 9 до 26 В (рис. 1).

Испытания проводились на контрольной партии ламп ЛСМ8 ($U_{\text{ном}} = 8$ В). Первоначальные электрические и световые параметры каждого образца (прямое напряжение, ток, световой поток, доминирующая длина волны, цветовая температура, координаты цветности) были измерены на измерительном комплексе Instrument Systems IS-2 (Германия). Методика испытаний на КТЗ заключалась в ступенчатом повышении напряжения питания:

- кассета помещалась в термокамеру ($T = 25$ °С);
- на каждую ступень напряжение повышалось на 1 В (начиная с 9 В);

– на каждой ступени образцы выдерживались в течение 24 ч при соответствующей электрической нагрузке;

– после каждой ступени производилось измерение всех светотехнических параметров на вышеуказанном измерительном комплексе;

– критерием отказа и остановки испытаний было условие выхода из строя более 40% образцов.

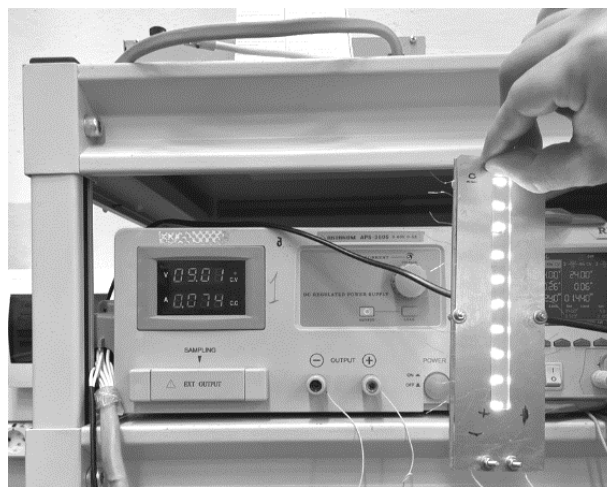


Рис. 1. Первая ступень испытаний ($U = 9$ В)

Для оценки надежности и расчета эквивалентного времени наработки использовалась модель ускоренных испытаний, связывающая время наработки при повышенной температуре с временем в нормальных условиях через коэффициент форсирования (K_f), рассчитываемый по формуле Аррениуса.

В ходе испытаний зафиксированы изменения ключевых параметров: светового потока, цветовой температуры, координат цветности и прямого напряжения. Установлено, что основная причина отказов на высоких ступенях напряжения (25–26 В) связана не с деградацией самих полупроводниковых кристаллов, а с термическим разрушением конструкции лампы (расплавление припоя, деформация платы, отслоение металлизации платы) (рис. 2).

Результаты измерений светотехнических параметров до проведения испытаний и на предпоследней 9-й ступени ($U = 25$ В, $T = 25$ °С), на которой происходит активация отказов изделий, приведены в таблице.

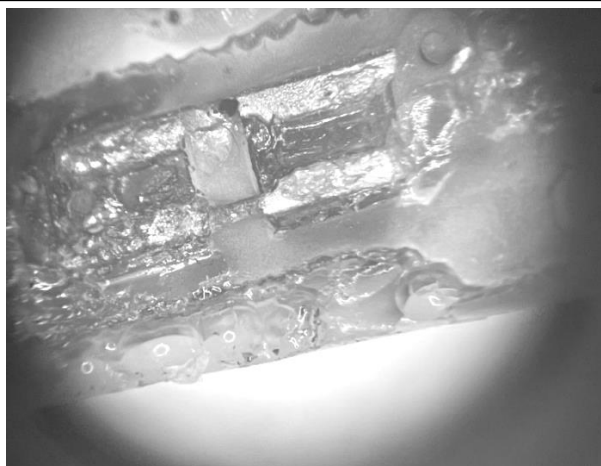


Рис. 2. Термическое разрушение конструкции лампы

Результаты измерений светотехнических параметров до проведения испытаний и на предпоследней 9-й ступени

№ образца	До испытаний			
	Прямое напряжение U , В	Ток I , мА	Световой поток I_v , лм	Цветовая температура CCT, К
1	8	5,63	4,1	3315
2	8	5,57	4,164	3377
3	8	5,53	4,116	3336
4	8	4,2	3,131	3402
5	8	5,57	4,076	3323
6	8	5,63	4,304	3492
7	8	5,61	4,124	3316
8	8	5,58	4,126	3338
9	8	5,63	4,232	3290
10	8	5,63	4,032	3245
После IX ступени ($U = 25$ В, $T = 25$ °C)				
1	8	Отказ	–	–
2	8	5,29	3,05	–
3	8	5,61	2,5	–
4	8	4,16	2,79	–
5	8	Отказ	–	–
6	8	5,37	2,55	–
7	8	5,58	2,08	–
8	8	10,23	3,11	–
9	8	7,8	1,87	–
10	8	5,75	3,2	–

По результатам испытаний рассчитана эквивалентная наработка на отказ в нормальном режиме ($t_{ном} \approx 102231$ ч). Показано, что испытываемые лампы обладают значительным КТЗ по напряжению, превышающим паспортное значение более чем в 3 раза (максимально допустимое напряжение, при котором не произошло ни одного отказа, – 24 В, при номинальном напряжении – 8 В).

Исходя из полученных экспериментальных и расчетных данных, была построена оценочная зависимость срока службы полупроводниковой лампы ЛСМ8 от температуры окружающей среды (рис. 3).

Разработанная кассета и методика испытаний с ее применением позволяют проводить достоверные ускоренные испытания для прогнозирования надежности и срока службы полупроводниковых источников света.

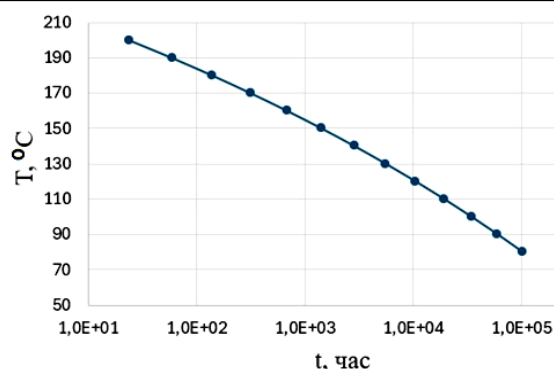


Рис. 3. Оценочная зависимость срока службы лампы ЛСМ8 от температуры окружающей среды

Практическая значимость работы заключается в разработке апробированной методики и оснастки для достоверного и быстрого определения КТЗ и прогнозирования ресурса полупроводниковых источников света, что крайне востребовано для производителей электронной компонентной базы. Полученные результаты показывают необходимость обращать внимание не только на качество чипов, но и на технологию их монтажа при проектировании высоконадежных осветительных устройств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Литература

- Schubert E.F. Solid-state lighting—a benevolent technology / E.F. Schubert, J.K. Kim, H. Luo, J.Q. Xi // Rep. Prog. Phys. – 2006. – No. 69. – P. 3069–3099.
- Cengiz C. ACritical Review on the Junction Temperature Measurement of Light Emitting Diodes / C. Cengiz, M. Azarifar, M. Arik // Micromachines. – 2022. – No. 13. – P. 1615.
- Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2(28). – С. 51–53.

Грицай Александр Эдуардович

Студент каф. физической электроники (ФЭ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: gricsanya16@gmail.com

Грицай Роман Эдуардович

Студент каф. ФЭ ТУСУРа
Эл. почта: gricroma16@gmail.com

Петров Даниил Олегович

Студент каф. ФЭ ТУСУРа
Эл. почта: daniilpetrov.74@mail.ru

Гарипов Иван Фаритович

Науч. сотр. лаб. ИОР каф. ФЭ ТУСУРа
Эл. почта: vinilhlorid@mail.ru

А.Д. Гончаров, Д.О. Печникова

Методика расчета светотехнических характеристик линейных профильных световых и облучательных приборов

Выполнена разработка методики расчета светотехнических характеристик профильных линейных световых и облучательных приборов. Показано, что коэффициент полезного действия (КПД) зависит от ширины световой линии профиля и глубины установки источника излучения. Показано, что для определения КПД системы также важно учитывать оптические характеристики материалов используемых при создании профильных световых приборов. Методика расчёта КПД, основанная на использовании полученных в ходе исследования зависимостей, позволит сократить время проектирования и снизить потребность в натурных испытаниях. Результаты исследования могут быть применены в практике светотехнического проектирования для создания энергоэффективных осветительных систем.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия светильника, световой прибор.

Современные методы проектирования осветительных и облучательных установок различного назначения требуют наличия профильных линейных систем, которые представляют собой конструкцию из ленты, профиля и экрана [1].

Как правило, конструктивные составляющие и светотехнические характеристики таких систем становятся известны в процессе светотехнического проектирования, поэтому специалист по светотехническому проектированию должен обладать навыками разработки световых приборов, что показано авторами на панельной дискуссии «Светотехника: кадры для будущего» [2] в виде доклада и презентации. Причем в выступлении на конференции авторами также отмечалось, что КПД системы значительно зависит от конструктивных особенностей системы и ее оптических характеристик (коэффициента отражения профиля и светопропускания экрана).

Световой поток конечного светового и облучательного прибора является результатом произведения светового потока источника света на коэффициент полезного действия светильника (КПД). Поэтому основной проблемой при расчете светотехнических характеристик линейных профильных систем является расчет КПД светильника.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является разработка методики расчета светотехнических характеристик профильных линейных систем.

Работа соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать компьютерные программы для расчета светотехнических характеристик световых и облучательных приборов;
- выполнить расчет и определить зависимости КПД светильника от конструктивных характеристик профиля при разных коэффициентах отражения профиля и коэффициентах пропускания экрана;
- выполнить разработку фотометрического файла ies;
- выполнить практическое сравнение с результатами реальных измерений.

В рамках проведенного исследования выдвинута гипотеза о влиянии ключевых геометрических параметров светового прибора, таких как глубина установки источника излучения (H) и ширина световой линии (W) на его КПД. Подтверждение данной гипотезы позволяет установить аналитические зависимости, применимые для оптимизации расчетов линейных светотехнических систем.

Экспериментальное определение таких зависимостей сопряжено со значительными временными и ресурсными затратами. В связи с этим для моделирования и анализа оптических характеристик была использована программная среда, обеспечивающая виртуальное проектирование изделий и расчет светотехнических параметров.

Для выбора программы в качестве инструмента для светотехнического моделирования рассмотрен программный комплекс Ansys Speos for NX [3], интегрированный в CAD-платформу. Интеграция с системой автоматизированного проектирования обеспечивает эффективное взаимодействие между геометрической моделью и оптическим симулятором, что позволяет оперативно оценивать влияние конструктивных изменений на светораспределение и энергетические характеристики изделия.

Для валидации результатов численного моделирования проведены испытания профильных линейных светильников производства компании ООО «Арлайт Рус» в составе светодиодной ленты 015648(B) RT 2-5000 24V Day4000 5mm 2x (3528, 600 LED, LUX) при помощи гониоспектрометрической установки производства компании Viso Systems [4], результаты которых приведены в табл. 1.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных показывает удовлетворительную сходимость результатов, погрешность которых не превышает 10%, что подтверждает хорошую точность применяемой модели и достоверность полученных данных исследования для подтверждения выдвинутой гипотезы.

При помощи выбранного программного продукта авторами выполнен расчет КПД систем при разных отношениях ширины световой линии к глубине установки источника излучения. При расчете

учитывались дополнительные факторы, влияющие на КПД: коэффициент отражения внутренней поверхности профиля и коэффициент светопропускания экрана.

Таблица 1

Сводная таблица светотехнических характеристик, измеренных на гониоспектрометрической установке и промоделированных в Ansys Speos

Наименование профиля	Характеристика	Данные гониоспектрометрической установки	Данные Ansys Speos
MIC-H-COMFY-2000 ANOD (артикул 029844)	Световой поток, лм	212	201
	Световая отдача, лм/Вт	76	72
	Угол излучения C0–C180, град	115,9	118
	Угол излучения C90–C270, град	75,1	72,3
SL-COMFORT22-FANTOM-2000 ANOD (артикул 033275)	Световой поток, лм	242	250
	Световая отдача, лм/Вт	53	54
	Угол излучения C0–C180, град	116,7	116
	Угол излучения C90–C270, град	39,9	39,7

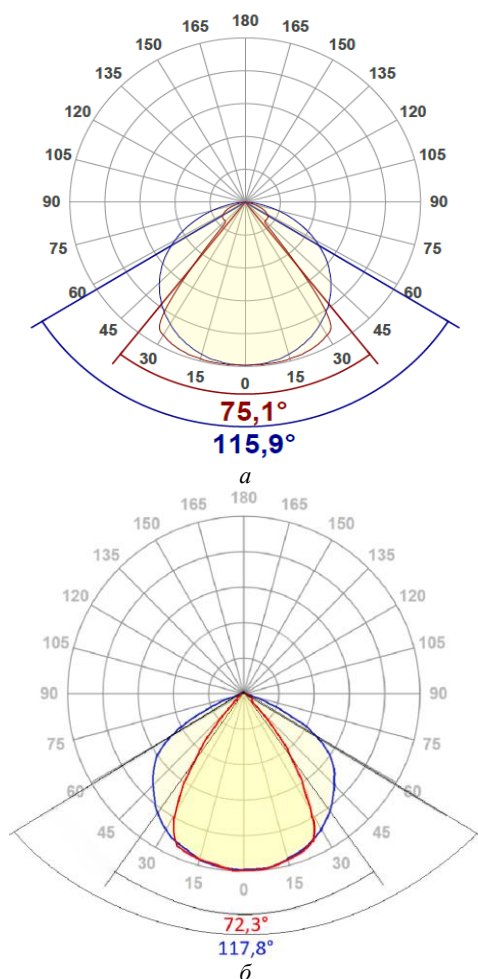


Рис. 1. КСС светодиодной ленты 015648(B) RT 2-5000 24V Day4000 5mm 2x (3528, 600 LED, LUX) в составе профиля MIC-H-COMFY-2000 ANOD:

а – данные гониоспектрометрической установки;
б – данные из IES-файла, полученного в Ansys Speos

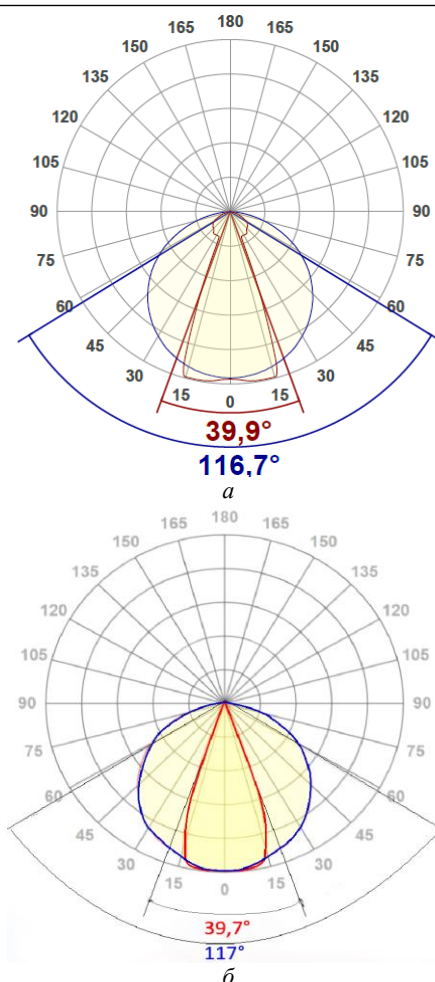


Рис. 2 КСС светодиодной ленты 015648(B) RT 2-5000 24V Day4000 5mm 2x (3528, 600 LED, LUX) в составе профиля SL-COMFORT22-FANTOM-2000 ANOD:

а – данные гониоспектрометрической установки;
б – данные из IES файла, полученного в Ansys Speos

Для получения аналитических выражений в виде зависимостей применены несколько типов светотехнических профилей с различными геометрическими и оптическими параметрами (рис. 3).

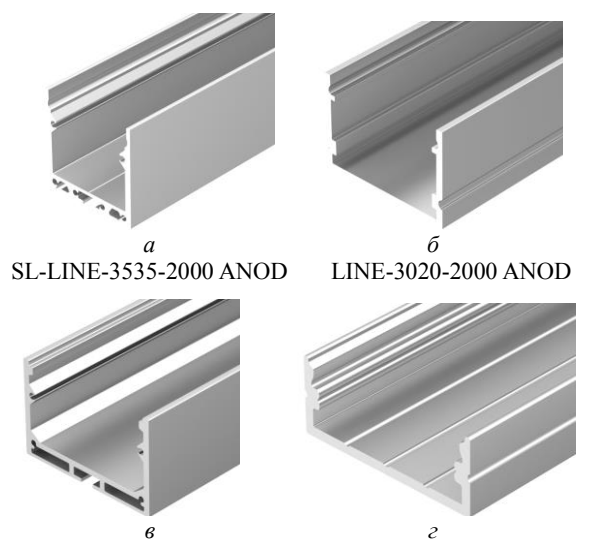


Рис. 3. Внешний вид профилей

В табл. 2 представлены артикулы и внешний вид части исследуемых профилей производства компании ООО «Арлайт Рус».

Таблица 2

Номенклатура профилей		
Артикул	W/H	Внешний вид
019306	1	См. рис. 3, а
046962	1,5	См. рис. 3, б
020465	1,73	См. рис. 3, в
016142	2,3	См. рис. 3, г

Авторами построены зависимости КПД системы от коэффициента отражения (ρ) при различных отношениях W/H (рис. 4).

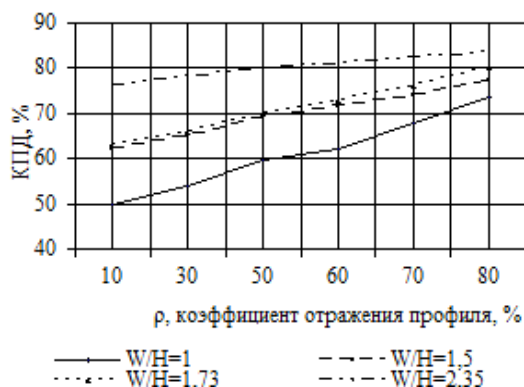


Рис. 4. Зависимость КПД профилей с различными W/H от отношения ширины световой линии к глубине установки источника излучения

По полученным зависимостям определены аналитические выражения, которые аппроксимированы полиномом второй степени, достоверность аппроксимации R^2 которых более 0,995:

Зависимость W/H =	КПД =
1	$0,0035 \cdot \rho^2 + 0,0156 \cdot \rho + 49,754$
1,5	$0,0013 \cdot \rho^2 + 0,0961 \cdot \rho + 60,896$
1,73	$0,0024 \cdot \rho^2 + 0,0199 \cdot \rho + 62,779$
2,35	$0,0003 \cdot \rho^2 + 0,0788 \cdot \rho + 75,372$

Для построения зависимостей КПД системы от коэффициента светопропускания экрана (τ) и коэффициента отражения профиля с целью моделирования экранов в выбранной программе применены оптические материалы, которые приведены в табл. 3 [5].

Таблица 3

Характеристики экранов		
Наименование материала	Характеристика	Значение
Alcom 740/4 UV WT 1082 08D2 WT	Степень матовости, %	95
	Коэффициент светопропускания, %	53,5
	Угол излучения по уровню 0,5 от максимальной силы света, град	102
	Коэффициент светопропускания, %	20
Alcom LD2 PC 1000 UV 14019 WT 1030-14 White	Степень матовости, %	95
	Коэффициент светопропускания, %	20
	Угол излучения по уровню 0,5 от максимальной силы света, град	112

Продолжение табл. 3

1	2	3
Alcom PC 740/4 UV GU 1156-04 LD	Степень матовости, %	95
	Коэффициент светопропускания, %	29
	Угол излучения по уровню 0,5 от максимальной силы света, град	76
	Коэффициент светопропускания, %	74
	Угол излучения по уровню 0,5 от максимальной силы света, град	44

На рис. 5 приведена зависимость КПД системы от коэффициента отражения профиля LINE-3020-2000 ANOD с разными типами оптических экранов.

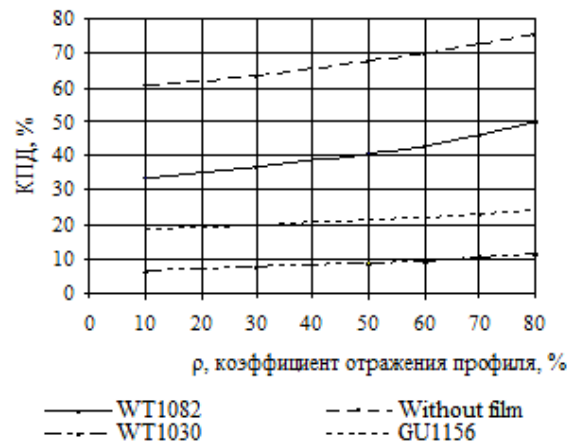


Рис. 5. Зависимость КПД профиля LINE-3020-2000 ANOD от коэффициента светопропускания экрана и отражения профиля

По полученным зависимостям определены аналитические выражения, которые аппроксимированы полиномом второй степени, достоверность аппроксимации R^2 которых более 0,998:

Зависимость	КПД =
WT1082	$0,002 \cdot \rho^2 + 0,0525 \cdot \rho + 32,899$
WT1030	$0,0007 \cdot \rho^2 + 0,0007 \cdot \rho + 6,7226$
GU1156	$0,0005 \cdot \rho^2 + 0,0339 \cdot \rho + 18,282$
Without film	$0,0013 \cdot \rho^2 + 0,0949 \cdot \rho + 59,358$

На рис. 6 приведена зависимость КПД системы от коэффициента светопропускания экрана при разных отношениях W/H.

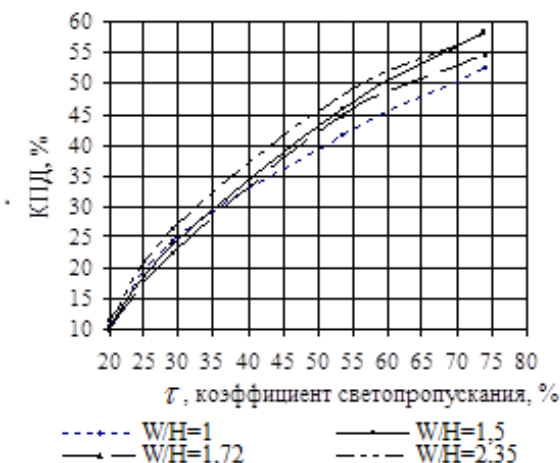


Рис. 6. Зависимость КПД профилей с различными W/H от коэффициента светопропускания экрана

По полученным зависимостям определены аналитические выражения, которые аппроксимированы полиномом второй степени, достоверность аппроксимации R^2 которых более 0,998:

Зависимость $W/H =$	КПД =
1	$-0,0089 \cdot \tau^2 + 1,5764 \cdot \tau - 15,906$
1,5	$-0,0093 \cdot \tau^2 + 1,7533 \cdot \tau - 20,327$
1,73	$-0,0107 \cdot \tau^2 + 1,8321 \cdot \tau - 21,996$
2,35	$-0,0125 \cdot \tau^2 + 2,0108 \cdot \tau - 22,614$

Выводы

В ходе проведенного исследования подтверждена выдвинутая гипотеза, что геометрические параметры светотехнического профиля, в частности, отношение ширины световой линии к глубине установки источника излучения, оказывают влияние на коэффициент полезного действия линейных светодиодных осветительных приборов.

Получены аналитические выражения КПД профиля от коэффициента отражения профиля, которые аппроксимированы полиномом второй степени с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,995$.

Получены аналитические выражения КПД профиля от коэффициента отражения профиля при использовании оптических экранов, которые аппроксимированы полиномом второй степени с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,998$.

Получены аналитические выражения КПД профиля от коэффициента светопропускания экрана, которые аппроксимированы полиномом второй степени с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,998$.

Полученные аналитические выражения позволяют рассчитать КПД системы, значения которого применяются для расчета светотехнических характеристик линейных профильных систем освещения.

По выявленным закономерностям выполнена оптимизация процесса создания стандартных фото-

метрических файлов для различной номенклатуры профильных светильников.

Результаты расчетов апробированы в номенклатуре профильных изделий производства компании ООО «Арлайт РУС», погрешность которых не превышает 10% по сравнению с практическими измерениями.

Литература

1. Официальный сайт компании ООО «Арлайт РУС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arlight.ru/catalog/alyuminievye-profil-390/> (дата обращения: 01.09.2025).
2. Сайт панельной дискуссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://interlight-building.ru/hr> (дата обращения: 01.09.2025).
3. Гараев Р.Р. Анализ и сравнение средств автоматизированного проектирования // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – 2019. – Т. IV. – С. 19–24.
4. Гончаров А.Д. Анализ проблем измерений фотометрических характеристик источников света и осветительных приборов // А.Д. Гончаров, Р.С. Гамзаева // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 287–290.
5. Электронная база оптических материалов от компании МОСОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mocom.eu/en/products/product-search#/?brand=ALCOM&feat=285/> (дата обращения: 01.09.2025).

Гончаров Александр Дмитриевич

Директор светотехнического департамента
ООО «Арлайт Рус»

Эл. почта: a.goncharov@transistor.ru

Печникова Дарья Олеговна

Инж.-разработчик ООО «Арлайт Рус»

Эл. почта: d.pechnikova@transistor.ru

А.В. Пономарева, Н.А. Репников

Функциональные полимерные и композитные материалы как основа технологий гибкой и печатной электроники

Рассматриваются функциональные полимерные и композитные материалы, такие как проводящие полимеры (PEDOT, полианилин), графеновые и углеродные нанотрубчатые композиты, а также гибкие диэлектрики (PDMS, полиимид), которые являются основой для технологий гибкой и печатной электроники. Эти материалы обеспечивают электропроводность, механическую гибкость, прочность и совместимость с печатными методами, что позволяет создавать гибкие дисплеи, сенсоры, носимую электронику и биоэлектронные устройства.

Ключевые слова: гибкая электроника, печатная электроника, проводящие полимеры, композитные материалы, графен, углеродные нанотрубки, полидиметилсилоксан, органические светодиоды, тонкопленочные транзисторы, биоэлектроника.

Современные тенденции развития электронной промышленности демонстрируют значительный сдвиг от классических жестких элементов к инновационным гибким решениям. Этот технологический скачок характеризуется переходом от традиционных кремниевых пластин к принципиально новым материалам, которые способны формировать электронные компоненты на гибких основах методами, схожими с печатными технологиями [1]. Основой для подобных преобразований служат специальные полимерные и композитные материалы, обладающие уникальными свойствами, которые кардинально отличаются от характеристик, используемых ранее.

Уникальные свойства проводящих полимеров

На передний план выходят проводящие полимеры, представляющие собой особый класс материалов, способных после модификации химическими методами приобретать электропроводящие свойства [2]. Такие соединения, как поли(3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT) или полианилин, сочетают в себе не только возможность проводить электрический ток, но и механическую гибкость, эластичность и удобство нанесения из раствора. Это открывает возможности для создания сложных электронных структур на различных поверхностях, включая пластиковые пленки и текстильные материалы, с использованием современных методов печати.

Композиты для улучшения характеристик

Для полноценного функционирования электронных устройств требуется более сложная комбинация материалов. Здесь ключевую роль играют композитные системы, объединяющие преимущества нескольких компонентов. Особое внимание заслуживают материалы на основе графена и углеродных нанотрубок, диспергированных в полимерной матрице. Эти композиты обеспечивают не только высокую электропроводность, но и значительно повышают механическую прочность и термическую устойчивость получаемых покрытий [3]. Параллельно развиваются исследования в области полупроводниковых полимеров, которые становятся основой для создания органических светодиодов и тонкопленочных транзисторов, являющихся базовыми элементами гибких дисплеев и логических схем [4].

Важность эластичных диэлектриков

Важным аспектом успешного функционирования гибкой электроники является использование надежных диэлектрических материалов. Эластичные полимерные системы, такие как полидиметилсилоксан (PDMS) или полиимид, выполняют функцию поддерживающих основ и изоляционных слоев, обеспечивая стабильность всей конструкции и предотвращая возможные короткие замыкания между элементами. Выдающаяся способность выдерживать многократные деформации без потери эксплуатационных характеристик делает их незаменимыми при создании носимых электронных устройств [5].

Методы нанесения и печати функциональных материалов

Совместимость функциональных полимерных и композитных материалов с современными методами печати является ключевым преимуществом, обеспечивающим производство гибкой электроники. Эти технологии позволяют с высокой точностью и эффективностью наносить электронные компоненты на различные гибкие подложки, включая полимерные пленки и текстиль [6].

Струйная печать выделяется благодаря своей универсальности и возможности цифрового управления процессом. Этот метод идеально подходит для нанесения функциональных чернил на основе PEDOT:PSS, графена или полианилина. Его основные преимущества включают высокое разрешение до 20 мкм, минимальное количество отходов материала и возможность работы с неровными поверхностями. Однако метод требует тщательной оптимизации реологических свойств чернил и обязательной постобработки для достижения желаемых проводящих свойств [7].

Трафаретная печать остается незаменимой для массового производства благодаря высокой скорости и возможности нанесения толстых слоев до 100 мкм. Эта технология особенно эффективна для создания проводящих дорожек, электродов и пассивных компонентов. К ее преимуществам относятся высокая производительность, возможность работы с вязкими чернилами и низкая стоимость оборудования. Ограничения метода заключаются в сравнительно низком разрешении и повышенном расходе материала [8].

Микроконтактная печать обеспечивает создание высокоточных паттернов с разрешением до 1 мкм с использованием эластичных штампов из PDMS. Этот метод особенно востребован для нанесения органических полупроводников и биомолекул. Его сильные стороны включают возможность печати на криволинейных поверхностях и низкую стоимость. Однако метод имеет ограничения, связанные со сложностью изготовления штампов и ограниченной площадью печати [9].

Для создания высококачественных функциональных слоёв в гибкой электронике применяются как методы осаждения из газовой фазы, так и жидкофазное нанесение. Со стороны газозфазных методов наиболее широко используются термическое и электронно-лучевое напыление, а также нанесение ионного покрытия, которые позволяют формировать тонкие, сплошные металлические или оксидные слои (например, прозрачные проводящие электроды из ИТО) с превосходной адгезией и контролируемой толщиной в нанометровом диапазоне [10].

Для формирования ультратонких и высокооднородных полимерных плёнок на плоских подложках ключевую роль играет нанесение методом центрифугирования, являющееся стандартом для создания активных слоёв в органических светодиодах (OLED) и тонкоплёночных транзисторах (TFT) [11].

Хотя традиционные методы осаждения ассоциируются с вакуумным оборудованием, современные разработки, такие как импульсное лазерное осаждение (PLD) и атмосферное плазменное напыление, открывают возможности для работы с термочувствительными полимерными подложками, что критически важно для гибкой электроники [12]. При этом центрифугирование, несмотря на его исключительную способность обеспечивать однородность слоёв толщиной от единиц до сотен нанометров, имеет ограничения в виде высокого расхода материала и сложности работы с большими или неплоскими подложками, что стимулирует развитие альтернативных методов, таких как щелевое напыление [13].

Выбор конкретного метода нанесения зависит от требований к разрешению, производительности и свойствам используемых материалов. Совершенствование этих технологий продолжает расширять возможности создания инновационных устройств гибкой электроники [14].

От лаборатории к практическому применению

Практическое применение этих инновационных материалов уже вышло за рамки исследовательских лабораторий. Современные технологии позволяют создавать рулонные дисплеи, гибкие сенсорные экраны и различные типы сенсоров, интегрируемые в упаковочные материалы и «умную» одежду. Особенно перспективным направлением становится развитие биоэлектроники, где эластичные электроды находят применение в медицинской диагностике, а биоразлагаемые датчики используются для монито-

ринга состояния здоровья пациентов непосредственно в организме [1, 5].

Заключение и перспективы развития функциональных материалов

Современные полимерные и композитные материалы формируют фундаментальную основу для развития технологий гибкой и печатной электроники. Уникальные свойства проводящих полимеров, графеновых композитов и эластичных диэлектриков обеспечивают необходимую комбинацию электропроводности, механической гибкости и технологичности производства.

Особое значение приобретают передовые методы нанесения и печати, включая струйную и трафаретную печать, микроконтактное литографирование, а также методы осаждения из газовой фазы. Эти технологии позволяют создавать сложные многослойные структуры с высоким разрешением на гибких подложках, что делает возможным массовое производство рулонной электроники.

Перспективными направлениями практического применения являются гибкие дисплеи и сенсорные экраны, создаваемые методами печатной электроники. Особый интерес представляют носимые медицинские устройства и биоэлектронные системы мониторинга, обеспечивающие непрерывный контроль показателей здоровья.

Значительный потенциал имеют решения для «умной» упаковки и текстиля с интегрированными сенсорами. Отдельного внимания заслуживают разработки в области биоразлагаемой электроники, направленные на создание экологически устойчивых технологий.

Основными вызовами остаются повышение стабильности материалов при многократной деформации и разработка экономичных методов производства. Перспективные исследования включают разработку самовосстанавливающихся материалов и гибридных систем, сочетающих органические и неорганические компоненты.

Дальнейшее развитие технологий печатной электроники откроет новые возможности для создания инновационных устройств, которые могут быть органично интегрированы в повседневную жизнь человека и окружающую среду.

Литература

1. Forrest S.R. The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic // *Nature*. – 2004. – Vol. 428. – P. 911–918.
2. Heeger A.J. Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2001. – Vol. 105. – P. 8475–8491.
3. Stankovich S. et al. Graphene-based composite materials // *Nature*. – 2006. – Vol. 442. – P. 282–286.
4. Sirringhaus H. 25th Anniversary Article: Organic Field-Effect Transistors: The Path Beyond Amorphous Silicon // *Advanced Materials*. – 2014. – Vol. 26. – P. 1319–1335.
5. Rogers J.A., Someya T., Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics // *Science*. – 2010. – Vol. 327. – P. 1603–1607.

6. Singh M. et al. Inkjet Printing-Process and Its Applications // *Advanced Materials*. – 2010. – Vol. 22. – P. 673–685.

7. Tekin E. et al. Inkjet Printing as a Deposition and Patterning Tool for Polymers and Inorganic Particles // *Soft Matter*. – 2008. – Vol. 4. – P. 703–713.

8. Krebs F.C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2009. – Vol. 93. – P. 394–412.

9. Xia Y. *Soft Lithography* / Y. Xia, G.M. Whitesides // *Angewandte Chemie International Edition*. – 1998. – Vol. 37. – P. 550–575.

10. Granqvist C.G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2007. – Vol. 91. – P. 1529–1598.

11. Meyer J. et al. Spin coating of organic semiconductors: From single droplets to thin films // *Journal of Materials Chemistry*. – 2011. – Vol. 21. – P. 17033–17042.

12. Park S.-H.K. et al. Large-area roll-to-roll and roll-to-plate atomic layer deposition: Status and outlook // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 547. – P. 42–46.

13. Søndergaard R.R. et al. Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells // *Materials Today*. – 2012. – Vol. 15. – P. 36–49.

14. Arias A.C. et al. Materials and applications for large area electronics: Solution-based approaches // *Chemical Reviews*. – 2010. – Vol. 110. – P. 3–24.

Пономарева Анастасия Владимировна

Студентка каф. РЭТЭМ Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: aponomareva1700@gmail.com

Репников Николай Андреевич

Студент каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: kolya20052018@gmail.com

В.Н. Давыдов, В.С. Сафонова, З.А. Зенкин

Блок температурных испытаний элементов оптоэлектроники на элементах Пельтье

Описана конструкция и экспериментальное исследование блока температурных измерений элементов оптоэлектроники, основанного на использовании термоэлектрических модулей Пельтье. Разработан и протестирован температурный блок, обеспечивающий изменение температуры исследуемого элемента от -12 до $+70$ °С. В исследовании применялась тепловизионная аппаратура для анализа распределения тепла и оптимизации конструкции. Отмечены перспективы расширения температурного диапазона в сторону низких ее значений. Полученные результаты позволяют использовать разработанный блок для измерения температурных характеристик фоточувствительных материалов и элементов оптоэлектроники.

Ключевые слова: элементы Пельтье, оптоэлектроника, температурные измерения, радиатор, вентилятор.

Современные элементы оптоэлектроники являются основой для множества устройств – от фотоприёмников и лазеров до светодиодов и сенсоров. Их характеристики зависят не только от структуры и состава материалов, но и от температурных условий эксплуатации, которые влияют на параметры полупроводников, механизмы токопротекания, а также на эффективность генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар. Это делает температурный фактор критическим при исследовании и проектировании оптоэлектронных систем.

Для исследования электрофизических свойств материалов и приборов оптоэлектроники применяются различные методики, включая измерения вольт-амперных, вольт-сименных и вольт-фарадных характеристик и др. Однако наиболее информативным подходом к изучению фундаментальных параметров и выявлению внутренних потенциальных барьеров является температурное тестирование. Оно позволяет оценить влияние тепловых процессов на электрофизические параметры объекта, энергетическую структуру полупроводников и выявить механизмы проводимости, которые недоступны при обычных электрических измерениях [1].

Температурные исследования особенно важны при анализе поликристаллических материалов, которые характеризуются наличием дефектов структуры, межзеренных границ и примесных уровней [2, 3]. Для практического применения оптоэлектронных устройств важно понимать, как изменяются их параметры в условиях как высоких, так и низких температур, включая глубокое охлаждение.

В последние годы особое внимание уделяется разработке компактных и экологически безопасных систем температурного сканирования. Классические методы охлаждения на основе жидкого азота или компрессорных холодильных установок имеют ряд недостатков: сложность эксплуатации, высокая стоимость и ограниченные возможности интеграции в лабораторные измерительные комплексы. В этом контексте использование термоэлектрических модулей Пельтье представляется перспективным направлением. Они лишены движущихся частей, отличаются компактностью, долговечностью и возможностью точного регулирования температуры.

Основным недостатком в работе с элементом Пельтье (ЭП) является отсутствие литературных данных о принципе работы этого элемента.

Создание компактного, управляемого и универсального блока температурных измерений обусловлено отсутствием серийных приборов, способных одновременно обеспечивать широкий диапазон рабочих температур и интеграцию с лабораторной оптической аппаратурой [4]. Использование ЭП в подобных устройствах даёт возможность реализовать как охлаждение, так и нагрев образцов, а также оперативно регулировать температурный режим без применения хладагентов и сложных холодильных систем. Таким образом, разработка универсального блока температурных измерений является актуальной задачей, способной повысить эффективность исследований в области оптоэлектроники.

В данной работе изложены результаты проектирования, изготовления и экспериментального исследования блока температурных измерений, основанного на эффекте Пельтье, а также анализе его эффективности и перспектив применения для изучения температурных зависимостей оптоэлектронных элементов.

Методика и материалы

Конструкция блока разрабатывалась в среде Autodesk Inventor Professional 2025. В качестве активных охлаждающих элементов использовались модули Пельтье типов TEC1-12703 и TEC1-12706. Для повышения эффективности применялись различные системы теплоотвода: радиаторы разной мощности, вентиляторы и экранирование исследуемых элементов различными теплоизолирующими материалами. Температура регистрировалась с использованием термопар и тепловизионной аппаратуры IRsoft.

Экспериментальное исследование

В работе исследовались две конфигурации элементов Пельтье: охлаждение полупроводникового элемента одним элементом Пельтье TEC1-12703 или TEC1-12706, а также их совместное использование в виде вертикального столбика с расположением внизу элемента Пельтье TEC1-12706. Тем самым охватывались все возможные ситуации экспериментального исследования охлаждающих свойств элементов.

Для эффективного охлаждения элемента Пельтье его необходимо было запитать постоянным током величиной до 2 А для TEC1-12703 и до 3 А для TEC1-12706. Превышение этих критических токов хоть и увеличивает эффект охлаждения, но уменьша-

ет эффективность охлаждения с помощью источника постоянного напряжения типа UT1803С, обеспечивая приемлемую скорость охлаждения. Установлено, что эффективность охлаждения ЭП возрастает по мере увеличения градиента температуры между охлаждающимся элементом и окружающей средой. Для повышения эффективности охлаждения использовались радиаторы различной формы, среди которых экспериментальным путем выбирались наиболее эффективные. Минимальная достигаемая температура при охлаждении пропорционально зависит от градиента температур объекта и радиатора: чем больше градиент, тем эффективнее охлаждение.

В работе исследовалась эффективность охлаждения ЭП с использованием нескольких стандартных радиаторов и изготовленных по собственным чертежам. В результате этого сравнения установлено, что стандартные радиаторы при всех их положительных сторонах оказались менее эффективны, чем изготовленные авторами.

Для уменьшения теплообмена охлаждаемого элемента и окружающей среды использовалась система тепловой изоляции охлаждаемого объекта с помощью различных изоляционных материалов. Установлено, что наиболее высокими изоляционными свойствами обладал 5-мм пористый поролон. Изоляции подвергался только элемент, показанный на рис. 1 под номером 2. Использование поролоновой изоляции дополнительно снизило влияние внешней среды, обеспечив стабильное поддержание низкой температуры даже при значительных изменениях окружающих условий.

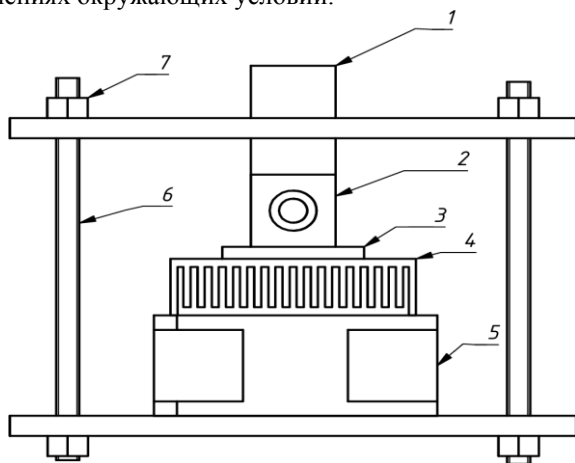


Рис. 1. Конструкция температурного блока:

- 1 – фиксатор датчика температуры (термопары);
- 2 – охлаждаемый держатель исследуемого элемента;
- 3 – элемент Пельтье; 4 – радиатор; 5 – вентилятор;
- 6 – шпилька; 7 – гайка

На первом этапе при использовании элемента TEC1-12703 (30×30 мм) температура от комнатной снизилась до минимальной +6 °С за время охлаждения порядка 8 мин. Смена направления протекания тока нагрела элемент до +70 °С со скоростью за время менее двух минут. Этим экспериментом показано, что диапазон изменения температуры, вызываемый применением ЭП, имеет ограничение только в

случае охлаждения. Поэтому все дальнейшие усилия были направлены на уменьшение минимальной температуры объекта.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость температуры элемента оптоэлектроники от времени охлаждения, при этом ток через ЭП составлял 2 А.

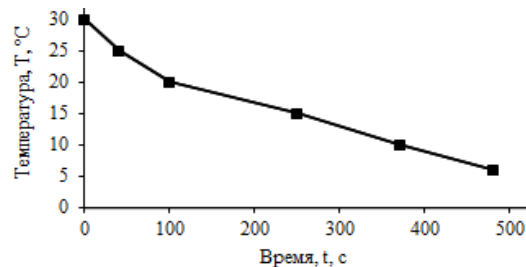


Рис. 2. Зависимость температуры охлаждаемого элемента от времени при силе тока 2 А через элемент Пельтье

Как следует из рис. 2, скорость понижения температуры на начальном участке (0–100 с) зависимости, равная 0,1 °С/с, выше, чем на последующем участке $3,8 \cdot 10^{-2}$ °С/с (время охлаждения более 100 с).

Данный эксперимент показал, что исследуемая конструкция и режимы охлаждения недостаточны для исследования узкозонных полупроводников.

Дальнейшая модификация установки проводилась по следующим направлениям: увеличение эффективности охлаждения радиатора, применение качественной теплопроводящей пасты «Arctic Cooling MX-4» на контакте «ЭП–радиатор» и замена охлаждающего ЭП на более мощный ЭП марки TEC1-12706 в сочетании в виде столбика с элементом TEC1-12703. Замена элемента TEC1-12703 на TEC1-12706 существенных изменений в достижении необходимой температуры не внесла. Применявшаяся теплопроводящая паста обладает теплопроводностью в восемь раз выше теплопроводности ранее применявшейся пасты КТП. Паста «Arctic Cooling MX-4» сохраняет свои высокие свойства в диапазоне от 150 до –50 °С. Данные меры повышения эффективности охлаждения позволили понизить температуру охлаждения по истечении 500 с до –6 °С (рис. 3).

Следующим этапом стало проведение дополнительного температурного исследования с использованием тепловизионного оборудования. Его целью являлась визуализация распределения температурных зон на элементах установки.

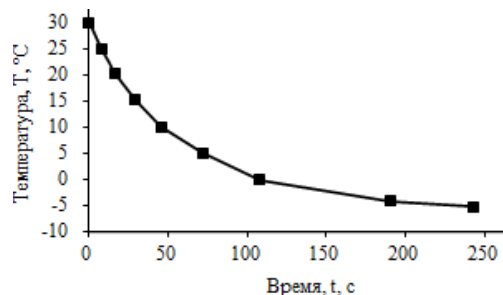


Рис. 3. Зависимость температуры охлаждаемого элемента от времени с производительным радиатором и при силе тока 3 А на элементах Пельтье и экранировке

Данные исследования позволили зафиксировать неравномерность нагрева радиатора и наличие участков с высоким уровнем перегрева, что свидетельствовало о проблемах с качеством теплового контакта между элементами Пельтье и радиатором. Графическое представление результатов тепловизионного исследования представлено на рис. 4.

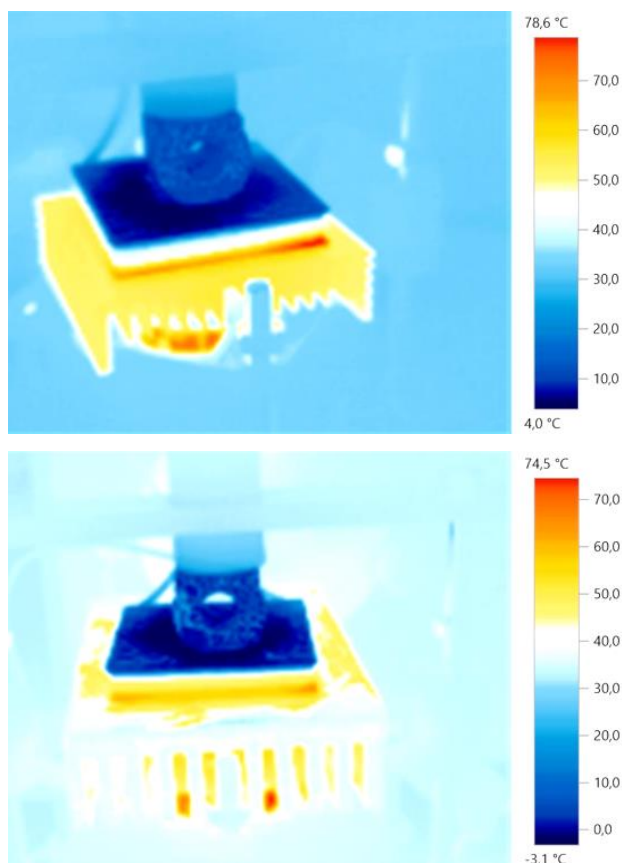


Рис. 4. Температурное исследование первой версии температурного блока с использованием сборки из двух элементов Пельтье TEC1-12706 и TEC1-12703

Изображения демонстрируют различную степень прогрева частей конструкции, подчеркивая важность равномерного распределения тепла для достижения оптимальной эффективности охлаждения. Эти наблюдения привели к решению заменить существующий радиатор на более мощный вариант. Новый радиатор представлял собой Ш-образную конструкцию размером 9,0×6,0×2,5 см.

Принятые меры позволили увеличить скорость охлаждения и достичь отрицательных температур примерно $-10 \dots -12^\circ\text{C}$ за время ≈ 500 с.

Обсуждение результатов

Составлена и оптимизирована конструкция блока температурных испытаний, использующих элементы Пельтье в виде одиночного элемента и столбика элементов. Определены минимальные и максимальные температуры, сконструированные с помощью данного устройства: при использовании одного ЭП марки TEC1-12703, нижнее значение температуры составляет $+6^\circ\text{C}$, верхняя температура составила $+70^\circ\text{C}$.

Использование структуры охлаждающего элемента в виде столбика обеспечивает уменьшение минимальной температуры до -6°C . На понижение температуры блока определяющее влияние оказывают не только мощность используемых ЭП (один или два элемента), но форма и размеры охлаждающего радиатора, мощности его обдува, а также тепловое сопротивление теплопроводящей пасты между нижним ЭП и поверхностью радиатора.

Заключение

Разработан и испытан блок температурных испытаний элементов оптоэлектроники на основе элемента Пельтье. Нагрев исследуемого элемента достигается за несколько минут до температур $70\text{--}80^\circ\text{C}$ без проблем в нагреве. Максимально низкая температура исследуемого объекта достигается за счет использования столбика из ЭП, теплоизоляции объекта охлаждения, использования радиатора с его обдувом и применения высокоэффективной теплопроводящей пасты между радиатором и ЭП.

Установлено, что факторы, ограничивающие температурный диапазон охлаждения-нагрева, могут быть расширены за счет модификации системы отвода тепла от радиатора, увеличения его охлаждающей поверхности и теплопроводящей пасты, улучшающей тепловой контакт «ЭП–радиатор», увеличения количества ЭП в столбике и применения высокоэффективной теплопроводящей пасты типа «Arctic Cooling MX-4» на всех тепловых контактах блока, в частности контакта «исследуемый объект–элементы его контакта со столбиком».

Литература

1. Давыдов В.Н. Основы оптоэлектроники: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2022. – 95 с.
2. Солимар Л. Лекции по электрическим свойствам материалов. – М.: Мир, 1991. – 501 с.
3. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. – М.: Сов. радио, 1979. – 227 с.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
5. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергия, 1991. – 416 с.
6. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956.

Давыдов Валерий Николаевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. электронных приборов (ЭП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: dvn@fet.tusur.ru

Сафонова Виктория Сергеевна

Аспирант каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: sunshine.rose187@gmail.com

Зенкин Захар Алексеевич

Студент каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: zenichfour@gmail.com

В.Н. Давыдов, В.С. Сафонова

Восстановление частотных свойств фотопроводимости поликристаллического CdSe

Рассматриваются частотные свойства фоторезистора из поликристаллического CdSe. Фотопроводимость изучалась в зависимости от частоты модуляции падающего излучения. Экспериментальные данные, демонстрирующие изменение фотопроводимости от частоты модуляции оптического излучения, показали провал сигнала в области низких частот с выходом на максимум и последующий спад на высоких частотах. Обнаруженное нарастание связывается с падением тестового сигнала на емкости омических контактов, включенной последовательно с объемом полупроводника. Предложена коррекция частотной зависимости фотопроводимости путем устранения низкочастотного нарастания выбором аппроксимации экспериментальной зависимости подбором времени релаксации фоторезистора по теоретической частотной зависимости. Предложенная коррекция позволяет повысить точность определения времени релаксации более чем на 10%.

Ключевые слова: поликристаллический селенид кадмия, частотные зависимости, поликристаллический CdSe.

Полупроводниковые фоторезисторы находят широкое применение в различных областях науки и техники – от астрономии и спектроскопии до систем видеонаблюдения, телекоммуникаций и систем управления. Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность работы таких устройств, является время релаксации фотопроводимости (ФП), характеризующей скорость изменения сигнала, а также его максимальное значение. Особенно важно значение времени релаксации при разработке высокочувствительных пороговых фотоприемных устройств. Более того, для практического применения важно знать не только максимальное значение ФП, но и её зависимость от частоты модуляции излучения, что необходимо для определения диапазона частот принимаемого излучения без искажений, определения равномерности частотной характеристики [1–3].

Не менее важным фактором является инерционность экспериментальной установки, которая может ограничивать точность измерений частотной характеристики. Время отклика системы, включая электронику и оптические компоненты, должно быть значительно меньше характерных времен релаксации в фоторезисторе, чтобы обеспечить корректную регистрацию изменений ФП на высоких частотах модуляции.

Одним из перспективных материалов для создания фоточувствительных элементов является селенид кадмия (CdSe). Поликристаллические фоторезисторы на его основе обладают полосой пропускания частот от единиц герц до нескольких килогерц, что обусловлено особенностями их структуры и механизмами рекомбинации носителей заряда. Ограничение верхней границы полосы пропускания связано с инерционностью процессов генерации и рекомбинации, а также с неоднородностью поликристаллической структуры, влияющей на скорость отклика прибора.

В данной работе предложена методика восстановления экспериментальной частотной зависимости ФП поликристаллического образца CdSe до ее совпадения с аналогичной теоретической зависимо-

стью, позволяющей повысить точность определения времени релаксации более чем на 10%.

Экспериментальная часть

При измерении частотной зависимости сигнал, подаваемый с генератора синусоидальных колебаний на светодиод, вызывает изменение интенсивности генерируемого оптического излучения. Поглощаясь в полупроводнике, оно вызывает появление в нем напряжения ФП на частоте генератора. Меняя частоту модуляции тестового излучения на длине волны 0,64 мкм в частотном диапазоне от 10^1 до 10^4 Гц, строится частотная характеристика исследуемого образца.

В качестве исследуемых образцов использовались фоторезисторы марки СФ-3Б, имевшие исходное сопротивление более 10^8 Ом.

На рис. 1 представлена частотная зависимость фотопроводимости $U_{\text{фп}}(f)$ при напряжении смещения, равном 2,5 В, в логарифмических координатах: по оси абсцисс отложен логарифм частоты модуляции $\lg(f)$, а по оси ординат – логарифм сигнала фотопроводимости $\lg(U_{\text{фп}})$.

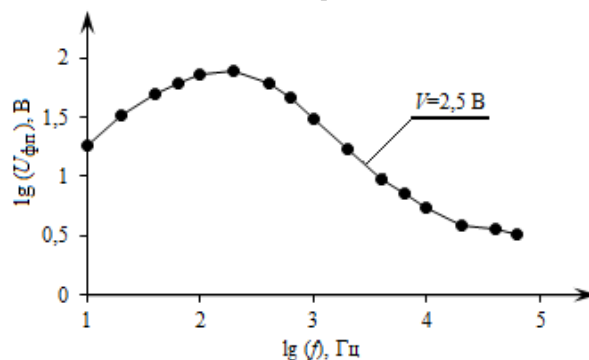


Рис. 1. Частотная зависимость фотопроводимости для образца СФ3-2Б

Как можно видеть из рис. 1, зависимость демонстрирует наличие выраженного максимума в области $\lg(f) = 2,3$, что соответствует частоте около 200 Гц. После достижения максимального значения наблюдается спад амплитуды фотопроводимости.

сти, связанный с ограничениями по быстродействию исследуемого материала. Если спад на высокой частоте является типичным проявлением инерционности фотопроводникового отклика и указывает на наличие конечного времени отклика устройства на модулированное освещение, то наличие подъема на низких частотах является необычным для данного вида зависимостей [3].

Основное последствие наличия низкочастотного подъема заключается в том, что при его наличии невозможно установить максимальное значение сигнала ФП, по которому определяют частоту среза $f_{\text{ср}}$ и время релаксации сигнала $\tau_{\text{фп}} = 1/f_{\text{ср}}$. Действительно, если за максимальное значение ФП взять ее максимальное значение из экспериментальной кривой на частоте порядка 200 Гц, по уровню 0,71, то найденное таким образом время релаксации по частоте среза (около 300 Гц) составит $\tau_{\text{фп}} = 3,3$ мс, которое может в значительной степени из-за неточного определения максимального значения сигнала ФП отличаться от истинного значения этой величины.

Обсуждение экспериментальных данных

Для объяснения полученного результата и поиска путей устранения негативного влияния низкочастотного подъема обратимся к физической модели фоторезистора. Наиболее вероятной причиной его появления может быть влияние емкости C_0 омических контактов к образцу, выполненной из непрозрачного материала. Тогда на низких частотах, имея емкостное сопротивление $X_c = 1/\omega C_0$, с ростом частоты это сопротивление будет убывать. При этом будет уменьшаться и падение напряжения на этой емкости и, следовательно, напряжение на фоточувствительной части ФР будет возрастать. Это наглядно демонстрирует низкочастотный подъем сигнала ФП на экспериментальной зависимости.

Проведенные измерения частотной зависимости емкости ФР на низких частотах показали, что предполагаемая емкость действительно имеет место и по величине составляет порядка 20 пФ, что подтверждает сделанное предположение о ее малой величине.

Учитывая ее наличие и природу, можно утверждать, что на низких частотах емкость контактов способна оказать большое влияние на инерционные свойства ФР. Для выяснения ее роли необходимо использовать модель, описывающую инерционные свойства ФР. Для этого необходимо составить эквивалентную RC цепь с учетом дополнительной емкости. Если эквивалентная цепь фоточувствительной области ФР описывается параллельной $R_{\text{ф}}C_{\text{ф}}$ -цепью, то сопротивление омических контактов будет включено в эту цепь последовательной емкостью C_0 . После простых преобразований, показанных на рис. 2, результирующая эквивалентная цепь ФР будет иметь вид последовательной цепи с емкостью $C_{\Sigma} = C_{\text{ф}}C_0/(C_{\text{ф}} + C_0)$. В данном выражении емкость контактов входит в эквивалентную емкость, но не участвует в формировании ФП, так как материал

контакта непрозрачен для тестового излучения. В итоге сигнал ФП формируется без вклада этой емкости в сигнал, но уменьшая прикладываемое к фотоплощадке напряжение.

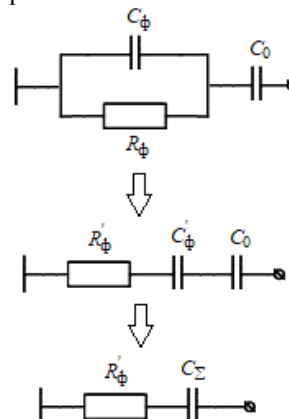


Рис. 2. Эквивалентная схема фоторезистора с учётом ёмкостей C_0 , $C_{\text{ф}}$ и сопротивления $R_{\text{ф}}$

Амплитуда ФП при освещении тестовым излучением описывается выражением [2]

$$U(f) = \frac{U_{\text{фп}}^{(\text{макс})}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_{\text{фп}}^2}}. \quad (1)$$

Здесь $U_{\text{фп}}^{(\text{макс})}$ – амплитуда отклика на низкой частоте (при $f \rightarrow 0$); $\omega = 2\pi f$ – круговая частота модуляции; $\tau_{\text{фп}} = C_{\Sigma}R_{\text{фп}}$ – время релаксации. Из выражения (1) находим (см. рис. 2):

– на низких частотах, когда $\omega\tau_{\text{фп}} \ll 1$:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{\text{ф}}C_0}{C_{\text{ф}}} = C_0; \quad (2)$$

– на средних частотах, когда $\omega\tau_{\text{фп}} \approx 1$:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{\text{ф}}C_0}{C_{\text{ф}} + (C_0/2)}; \quad (3)$$

– на высоких частотах, когда $\omega\tau_{\text{фп}} \gg 1$:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{\text{ф}}C_0}{C_{\text{ф}} + C_0}. \quad (4)$$

Зависимость вида (1) демонстрирует характерное уменьшение фотопроводимости с ростом частоты, что согласуется с теоретическим поведением системы с низкочастотным фильтром первого порядка. Согласование экспериментальных данных с моделью свидетельствует о том, что основное ограничение быстродействия исследуемого фоторезистора обусловлено именно инерционными процессами в полупроводнике, связанными с конечным временем жизни носителей заряда [4].

Снижение фотопроводимости на высоких частотах связано с тем, что носители не успевают рекомбинировать или перемещаться под действием электрического поля до момента следующего повышения частоты. Это указывает на наличие предель-

ной частоты, выше которой устройство теряет свою чувствительность, реагируя на увеличение частоты все меньшим отклонением числа рекомбинируемых носителей заряда от числа прорекомбинированных носителей на предыдущей частоте модуляции излучения. Такое же поведение наблюдается и в других полупроводниковых фотоприёмниках, работающих в импульсных и высокочастотных режимах [1, 4].

В случае когда емкость контактов меньше емкости фоточувствительной площадки $C_0 \ll C_{\Phi}$ и при неизменном значении сопротивления ФП, время релаксации уменьшается до малых значений, что приводит к случаю низких частот на любой частоте – частотная зависимость вида (1) переходит в прямую, параллельную оси частот и равную C_0 . Поэтому в этом случае измеряемая частотная зависимость будет иметь вид нарастающей кривой, описывающей увеличение тестового напряжения на сопротивлении R_{Φ} , т.е. нарастающую кривую.

Идея восстановления формы экспериментальной частотной зависимости до формы теоретической кривой состоит в том, что как в области низких частот, так и в области высоких частот эти зависимости определяются временем релаксации. Поэтому, управляя этим параметром, формируем как низкочастотный, так и высокочастотный участки зависимости. Взяв за начальное значение $\tau_{\Phi n}$ и «перебирая» его, строим теоретическую кривую. На конечном этапе экспериментальная и теоретическая кривые должны совпасть в области высоких частот.

Построенная модель, учитывающая емкость омических контактов в формировании частотных свойств ФР, позволяет не только повысить точность определения одного из важнейших параметров фотоприемного устройства, но и глубже понять роль технологических операций по изготовлению фотоприемного устройства в формировании его электрических параметров.

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальной зависимости с результатами теоретической аппроксимации, полученной по вышеизложенной методике.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование частотной зависимости фотопроводимости образца фоторезистора на основе поликристаллического CdSe показало, что в этой зависимости имеется особенность, непредусмотренная теорией частотных свойств фотопроводимости: низкочастотный завал

характеристики, охватывающий диапазон частот от единиц до двухсот герц. Установлено, что данный завал вызван действием емкости омических контактов к полупроводнику. Предложенная модель фоторезистора, учитывающая наличие этой емкости, хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет корректно описать инерционные свойства полупроводника введением корректирующего увеличения времени релаксации.

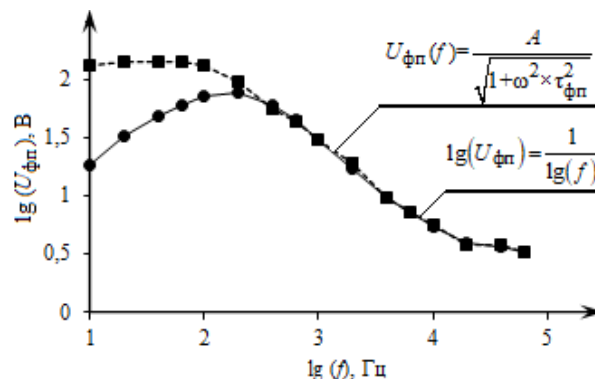


Рис. 3. Частотная зависимость ФП для образца СФ3-2Б

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции фотоприёмных устройств и в практической деятельности при использовании инерционных свойств поликристаллических полупроводников.

Литература

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. – М.: Наука, 1988. – 560 с.
2. Керн М.Д. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1975. – 784 с.
3. Основы оптоэлектроники / под ред. А.В. Савельева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с.
4. Кошкин В.Н. Фотоприёмные устройства / В.Н. Кошкин, А.Н. Шульгин. – М.: Радио и связь, 1991. – 240 с.

Давыдов Валерий Николаевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. электронных приборов (ЭП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: dvn@fet.tusur.ru

Сафонова Виктория Сергеевна

Аспирантка каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: sunshine.rose187@gmail.com

П.В. Шачнева, С.Б. Туранов

Перспективы применения динамического освещения в офисной среде

Исследование демонстрирует потенциал динамического освещения для офисов. Расчет показал, что адаптивные системы, регулирующие свет в зависимости от естественной освещенности, позволяют достичь не менее 50% экономии энергии в сравнении с традиционными системами. Также такие системы освещения оказывают положительное влияние на когнитивные функции сотрудников и формируют комфортную световую среду.

Ключевые слова: биодинамика, освещение, цветовая температура, энергоэффективность.

Современный офис представляет собой сложную экосистему, где качество освещения напрямую влияет на эффективность работы сотрудников и потребление энергии. Традиционные системы статического освещения, работающие по фиксированному графику, не учитывают динамику естественного света и потребности пользователей. В условиях, когда до 40% электроэнергии в офисных зданиях расходуется на свет [1], а более 36 млн россиян работают в офисах [2], актуальной задачей становится внедрение интеллектуальных решений.

Перспективным направлением является развитие динамического освещения, позволяющего автоматически адаптировать свои параметры (интенсивность, цветовую температуру) в реальном времени. В отличие от статического динамическое освещение имитирует естественные изменения света в течение дня, подстраивается под наличие людей в помещении и даже может учитывать их психофизиологическое состояние. Данная работа исследует потенциал применения таких систем в офисной среде с точки зрения энергосбережения и повышения качества условий труда.

Динамическое освещение: концепция и компоненты

Динамическое освещение – это комплексный подход к организации световой среды, при котором параметры света (освещенность, цветовая температура, спектральный состав) автоматически изменяются в зависимости от:

- времени суток и уровня естественного освещения;
- присутствия и расположения людей в помещении;
- выполняемых задач и индивидуальных предпочтений пользователей.

Технологической основой для таких систем служит сочетание аппаратных и программных компонентов:

1. Светодиодные светильники с регулируемой цветовой температурой (2700–6000 К) и интенсивностью света.
2. Датчики окружающей среды (освещенности, присутствия, температуры и др.).
3. Системы компьютерного зрения для анализа поведения и состояния пользователей (выявление признаков усталости, определение занятости рабочих мест).

4. Платформы IoT для интеграции всех компонентов в единую сеть и удаленного управления.

Оценка энергоэффективности

Для количественной оценки преимуществ динамического освещения был проведен сравнительный анализ энергопотребления традиционной и интеллектуальной системы для типового офисного помещения площадью 36 м². Критерием для включения и регулировки искусственного света служило поддержание нормируемой освещенности на рабочем месте в 500 лк согласно СП 52.13330.2016. Для расчета были выбраны два характерных дня: 21 декабря и 21 июня в г. Томске на основе данных о солнечной инсоляции [3] и коэффициенте естественной освещенности (KEO = 0,9%).

Традиционная система смоделирована по классическому принципу: светильники (10 шт. мощностью по 30 Вт каждый) включаются на полную мощность, как только естественная освещенность падает ниже нормы. Были построены графики естественной освещенности в помещении и освещенности традиционной системы в зависимости от времени суток (рис. 1, 2).

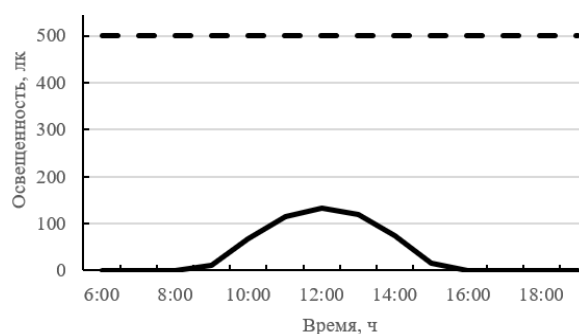


Рис. 1. Составляющие освещенности зимним днем при традиционной системе: — — естественное освещение; - - - - традиционное освещение офиса

Динамическая система включает светильники в тех же точках и использует датчики освещенности и компьютерное зрение для анализа двух факторов: уровня естественного света в различных зонах помещения, присутствия и расположения сотрудников. Светильники (10 шт., светодиодные, с торцевой подсветкой мощностью 20 Вт каждый) имеют зональное управление и плавную регулировку мощности (0–100%). Построенные графики (рис. 3 и 4), демонстрируют, как изменяется мощность светильников

адаптивной системы, опираясь на данные естественной освещенности.

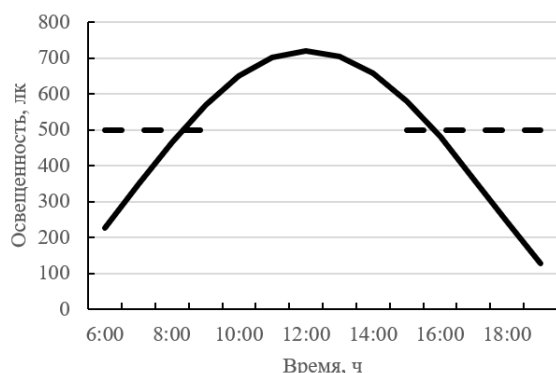


Рис. 2. Составляющие освещенности в кабине летним днем при традиционной системе: — — естественное освещение; - - - - традиционное освещение офиса

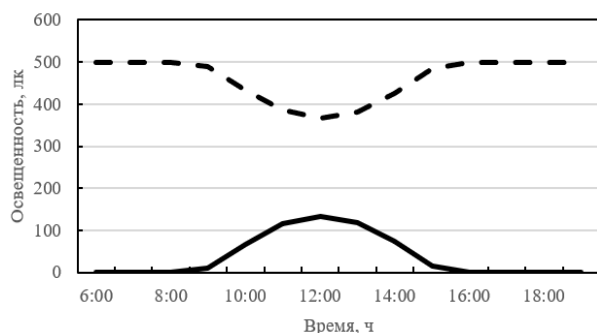


Рис. 3. Составляющие освещенности в кабине зимним днем при адаптивной системе: — — естественное освещение; - - - - адаптивное освещение офиса

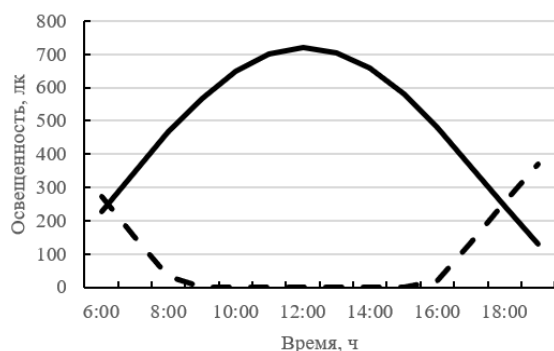


Рис. 4. Составляющие освещенности в кабине летним днем при адаптивной системе: — — естественное освещение; - - - - адаптивное освещение офиса

Результаты расчетов энергоэффективности

Анализ работы традиционной системы показал, что в зимний период все светильники работают на полной мощности примерно 8 ч в сутки, а в летний – около 3 ч. Расчет энергопотребления за год для традиционной системы E_T (1) учитывает потребление и в зимний период $E_{З.Т}$, и в летний $E_{Л.Т}$.

$$E_T = E_{З.Т} + E_{Л.Т}. \quad (1)$$

Расчет потребления в один из периодов рассмотрим на примере летнего (2), учитывая количество светильников N , среднее количество часов в данный период $t_{Л.Т}$, мощность светильника P_T и ко-

личество дней, отнесенных к данному периоду N_L . Для удобства расчета в летнем и зимнем периодах возьмем одно количество дней $N_L = N_T = 182,5$ сут.

$$E_{Л.Т} = N \cdot t_{Л.Т} \cdot P_T \cdot N_T, \quad (2)$$

$$E_{Л.Т} = 10 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 182,5 = 109,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

По аналогии: $E_{З.Т} = 438 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, тогда годовое энергопотребление традиционной системы составило $E_T = 547,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Для динамической системы использовался подход, учитывающий регулировку мощности, но не учитывающий выключение системы при отсутствии персонала. Методика расчета для динамической системы производилась аналогично (1), (2), но с учетом того, что на полную мощность адаптивная система работала зимой – 6,5 ч, а летом – 1 ч.

Годовое энергопотребление адаптивной системы составит $E_d = 273,75 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ без учета датчиков движения.

Относительная экономия 50% при грубой оценке.

Влияние на продуктивность и перспективы внедрения

Помимо энергосбережения, динамическое освещение открывает перспективы для управления продуктивностью персонала. Известно, что цветовая температура света влияет на когнитивные функции человека: холодный белый свет (~6000 К) способствует концентрации внимания и рабочей активности, в то время как теплый свет (~2700 К) помогает расслабиться [4, 5].

Динамическая система может автоматически менять цветовую температуру в соответствии с естественными циркадными ритмами и расписанием рабочего дня.

Заключение

Проведенные расчеты демонстрируют значительный потенциал динамических систем освещения для офисной среды. Внедрение интеллектуального управления позволяет достичь экономии энергопотребления на уровне не менее 50% при одновременном создании адаптивной световой среды.

Перспективы широкого внедрения динамического освещения связаны с развитием IoT-платформ и снижением стоимости интеллектуальных компонентов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию алгоритмов управления и изучение долгосрочного влияния динамического освещения на здоровье и продуктивность сотрудников.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-20162, <https://rscf.ru/project/25-28-20162/> и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (соглашение № 02/7/2025).

Литература

1. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency in Buildings [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/iea-energyefficiency2021.pdf>, свободный (дата обращения: 12.09.2025).

2. Росстат. Трудовые ресурсы, занятость и безработица [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/labour>, свободный (дата обращения: 15.09.2025).

3. PV Lighthouse. Solar Spectrum Calculator [Electronic resource]. – Режим доступа: <https://www2.pvlighthouse.com.au/calculators/solar%20spectrum%20calculator/solar%20spectrum%20calculator.aspx>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).

4. Different human physical responses of visual performance within daylighting and artificial lighting / J. Shi, Q. Liang, L. Jin, T. Luo, B. Yang, Q. Pan, S. Zhang, P. Xue [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225001226>, свободный (дата обращения: 15.02.2025). DOI: 10.1016/j.jobe.2025.111886.

5. Шачнева П.В. Влияние цветовой температуры освещения на когнитивные функции // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 21–23 мая 2025 г.: в 3 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Ч. 2. – 332 с.

Шачнева Полина Владимировна

Магистрант отд. материаловедения, инженерной школы новых производственных технологий (ОМ ИШНПТ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Эл. почта: pvs22@tpu.ru

Туранов Сергей Борисович

Канд. техн. наук, доцент ОМ ИШНПТ НИ ТПУ
Эл. почта: turanov_sb@tpu.ru

Д.К. Шурикова, В.И. Копытова, Н.В. Краморенко, Е.Г. Незнамова

Влияние освещения на развитие водяного гиацинта

Представлены результаты лабораторного эксперимента по определению оптимальных условий содержания растений при искусственном освещении. Исследовалось влияние различных спектральных характеристик светодиодных источников на развитие растений. Результаты указывают на значимость спектрального состава света на условия культивирования *Eichhornia crassipes* в контролируемых средах.

Ключевые слова: *Eichhornia crassipes*, эйхорния, водяной гиацинт, культивирование, освещение, режим освещения.

Спектральный состав искусственного освещения играет ключевую роль для эффективного культивирования растений, включая водяной гиацинт (*Eichhornia crassipes*). Водяной гиацинт является перспективным водным растением, используемым для биологической очистки загрязнённых водоёмов и получения биомассы [1]. Растение используется в очистке сточных вод, производстве удобрений, биотоплива и биоматериалов. Эффективность применения растения определяется его высокой способностью усваивать нитраты, фосфаты и тяжёлые металлы, а также выделять кислород, способствуя улучшению качества воды [2, 3]. Целью настоящего исследования являлось определение оптимальных условий культивирования водяного гиацинта в лабораторных условиях при различных спектрах искусственного освещения.

Методологическая основа исследования

Растениям необходим свет определенной интенсивности для полноценного роста, питания и развития. Эффективное использование растениями солнечной энергии ограничено: летом оно составляет около 14 ч, зимой – лишь 3 ч в сутки в зависимости от региона. Например, на территории России продолжительность дня существенно варьирует: на юге она составляет от 10 до 14 ч, тогда как в средних широтах летом увеличивается до 16–17 ч, а зимой сокращается до 6–7 ч. Интенсивность естественного света также снижается из-за погодных условий, так, небольшая облачность снижает уровень солнечного потока в 2–4 раза, а дождь уменьшает его в 5–8 раз. Оптимальная освещенность для большинства тепличных культур находится в диапазоне 8–12 тыс. люкс. Зимой этот показатель резко падает до 4–6 тыс. люкс днем. Спектр видимого излучения находится в диапазоне 380–780 нм, эта часть солнечной радиации, доходящая до биоценозов, в том числе до растений, именно этот диапазон солнечного излучения используется в фотосинтезе. Инфракрасное излучение ускоряет цветение, короткие волны ультрафиолета (менее 250 нм) губительны для растений, но близкая к видимому спектру длина волн (300–380 нм) создает благоприятные условия [4].

Анализ современных технологий освещения выявил преимущества светодиодных (LED) светильников перед традиционными источниками света. Благодаря возможности комбинирования различных светодиодов в заданных пропорциях, удается

создать освещение, которое будет соответствовать потребностям растений. Такие устройства обеспечивают точное регулирование спектра, интенсивности и продолжительности освещения [5].

Материалы и методы

Модельный эксперимент проводился в лаборатории химии и технологии органических материалов (ЛХиТОМ) при ТУСУРа. В качестве объектов исследования использовались молодые растения *Eichhornia crassipes*. Растения содержались в пластиковых контейнерах объемом 2 л (по 5 растений на контейнер), заполненных отстоянной водопроводной водой. Внесение удобрения AQUABALANS-TOTAL осуществлялось дважды в неделю. Для освещения применялись пять вариантов источников света:

1. Светодиодная лента (White + 660 нм).
2. Холодный белый светильник (5000 К).
3. Холодный белый (5000 К + 660 нм + 730 нм).
4. Холодный белый (5000 К + 660 нм).
5. Тёплый белый (2700 К).

Температура воздуха поддерживалась на уровне +20...+26 °С, воды – +23...+25 °С [3]. Длительность опыта – 3 нед. Для оценки влияния света использовались следующие параметры: прирост биомассы, количество зелёных листьев, электропроводность и pH воды, а также интенсивность развития цианобактерий.

Результаты

Результаты модельного эксперимента показали, что наибольшая прибавка массы за период эксперимента отмечена в варианте с тёплым белым светом (2700 К), тогда как наибольший прирост зелёных листьев был зарегистрирован в варианте с холодным белым светом (5000 К + 660 нм) (рис. 1, 2). Электропроводность варьировала от 575 до 1050 мкСм/см. Прим этом более низкие значения коррелировали с лучшими показателями роста растений, что связано с активным потреблением растениями источников минерального питания (рис. 3). Значения pH находились в диапазоне 7,7–8,9, при этом отклонение выше 8,8 сопровождалось снижением прироста биомассы (рис. 4). Во всех вариантах наблюдалось развитие цианобактерий (рис. 5), что может указывать на необходимость дальнейших исследований по оптимизации параметров культивирования гиацинта, препятствующих активному размножению цианобактерий.

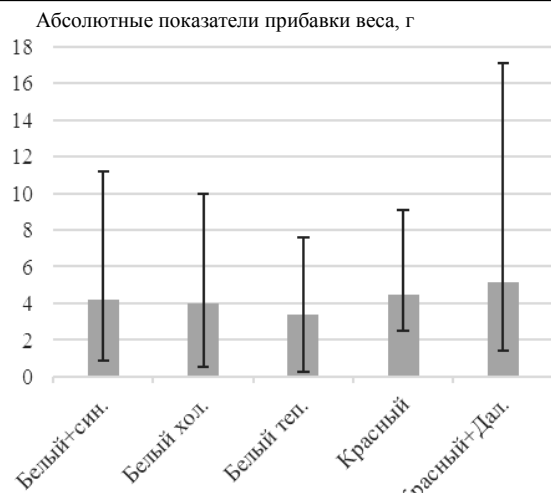


Рис. 1. Абсолютные показатели прибавки массы растений

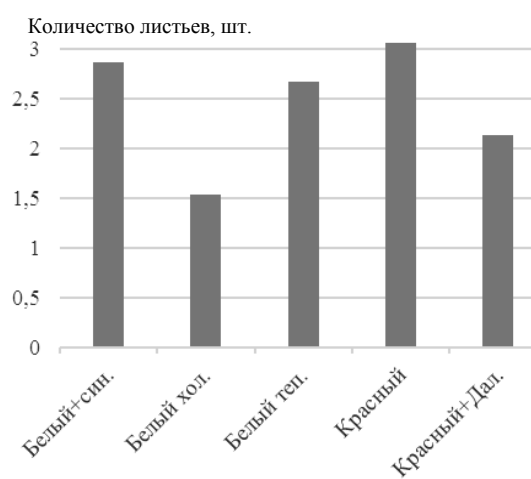


Рис. 2. Количество зеленых листьев

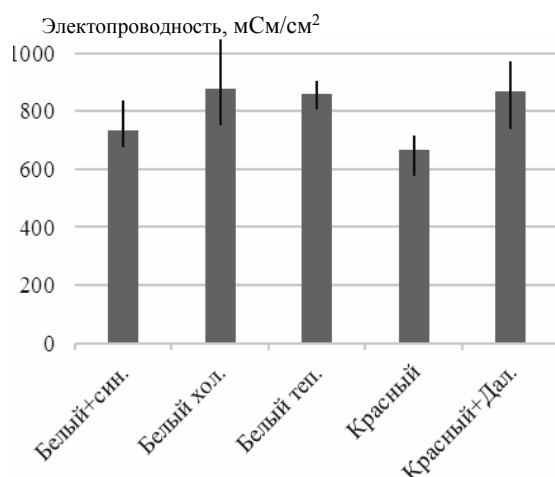


Рис. 3. Электропроводность

Таким образом, полученные результаты подтверждают значимость спектрального состава освещения для роста *Eichhornia crassipes*. Максимальный прирост биомассы при тёплом белом свете может быть обусловлен оптимизацией энергетического баланса фотосинтеза. Однако более высокое количество зелёных листьев при комбинированном спектре (холодный белый + красный диапазон) свидетель-

ствует о том, что красные длины волн обеспечивают улучшенный физиологический статус растений. Высокая электропроводность среды в вариантах с использованием светодиодной ленты и дальнего красного света связана с недостаточно активным поглощением растениями минерального питания, а щелочные значения pH свыше 8,8 снижали доступность микроэлементов.

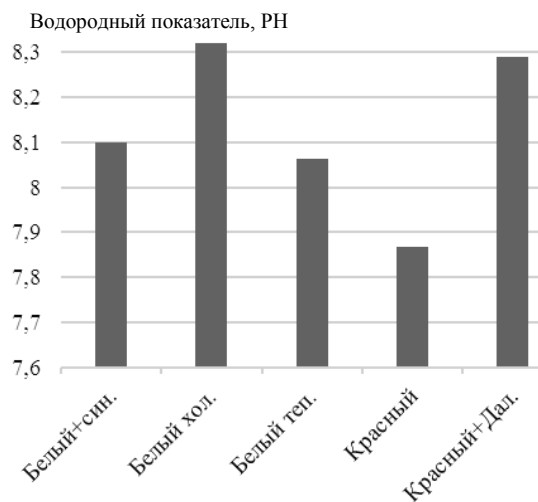


Рис. 4. Водородный показатель

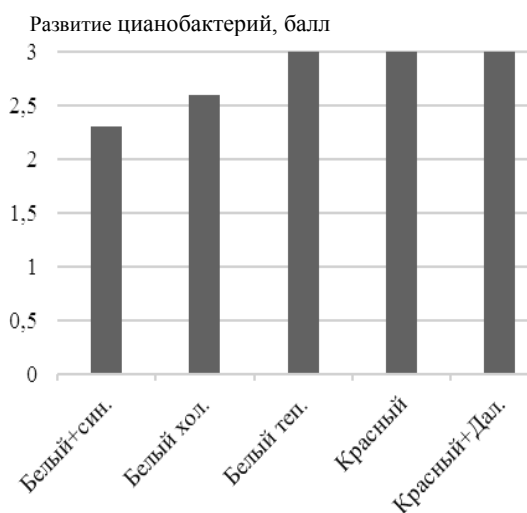


Рис. 5. Развитие цианобактерий

Заключение

Оптимальные условия культивирования *Eichhornia crassipes* в лабораторных условиях достигаются при использовании освещения с комбинированным спектром (холодный белый + 660 нм). Результаты могут быть использованы при разработке методик содержания водяного гиацинта для целей экологического мониторинга и биологической очистки воды.

Литература

1. Меркулова Т.Н. Применение плавающего водного растения эйхорнии для эффективности доочистки сточных вод // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – Сер.: Технические науки. – 2004. – № 4. – 100 с.

2. Synthesis and characterization of novel water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biodegradable mulch films / Zhenrong Liu, Yuwei Hu, Rumeng Dong, Shihao Zhang, Hu Li Rong Chen // *Industrial Crops and Products*. – 2024. – Vol. 222, Part 1. – № 119548.

3. Поглощение ряда тяжелых металлов из водных растворов растениями водного гиацинта (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) / О.М. Минаева, Е.Е. Акимова, К.М. Минаев, С.Ю. Семенов, А.Д. Писарчук // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология*. – 2009. – № 4 – С. 109–110.

4. Алиев Э.А. Выращивание овощей в гидропонных теплицах без почвы // *Урожай*. – 1971. – С. 59–67.

5. Червинский Л.С. Обоснование влияния спектрального состава источников световой энергии на жизнедеятельность растений в сооружениях закрытого грунта / Л.С. Червинский, Я.М. Луцак // *Инновации в сельском хозяйстве*. – 2014. – № 4 (9). – С. 62–64.

6. Копырина Л.И. Выращивание эйхорнии в условиях Центральной Якутии / Л.И. Копырина, Е.И. Иванова, Н.К. Сосина // *Наука и техника в Якутии*. – 2016. – № 2 (31). – С. 56–60.

Шурикова Дарья Константиновна

Студентка каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: shurikovadasha@gmail.com

Копытова Виолетта Игоревна

Студентка каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: violetta.kopytova2004@gmail.com

Краморенко Надежда Владимировна

Студентка каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: kramorenkonadezda58@gmail.com

Незнамова Елена Григорьевна

Канд. биол. наук, доцент каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: elena.g.neznamova@tusur.ru

В.И. Туев, К.Д. Иконникова

Частотный анализ устройства защиты электросети от перепада напряжения

Рассматривается актуальная научно-техническая задача определения ряда характеристик динамической схемы упругой конструкции при проведении испытаний на виброактивность изделия. Объектом исследования является внутреннее изделие в космическом аппарате – устройство защиты напряжения в сети электроснабжения. Рассматривается процесс компьютерного моделирования конструкции модели и выявления проблемных участков модели при воздействии вибраций. Объект и процесс моделируются с использованием стандартных пакетов автоматизированного проектирования: САПР P-CAD Schematic и «SolidWorks 2018». Показано, что при совпадении внешних и внутренних частот возникает явление резонанса, при котором амплитуды колебаний усиливаются, что может привести к трещинам и разрушениям составных частей и изделия в целом.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, радиоэлектронное устройство, механические внешние воздействующие факторы, виброустойчивость, колебательное звено, частотный анализ.

При функционировании исполнительные механизмы системы ориентации и бортовые приводные устройства космических аппаратов создают вибродинамические возмущения, которые влияют на чувствительную и малостойкую к вибрационным нагрузкам бортовую аппаратуру космических аппаратов [1–4]. Так, например, источниками постоянного вибрационного фона в космическом корабле являются двигатели (двигатели-маховики с вращающимися массами) и (двигатели-коррекции с пульсацией давления в камере сгорания и вибрацией элементов конструкции). Частота продолжительных вибрационных возмущений от двигателей лежит в диапазоне от 50 до 1000 Гц. Вибровозмущения на таких частотах отрицательно сказываются на точности работы всей высокоточной аппаратуры. Методы виброзащиты разработаны, однако устранить полностью такие возмущения технически затруднительно или практически невозможно [5].

Таким образом, исследование неблагоприятного влияния виброактивности высокоточной аппаратуры при наличии вибрационного фона внутри космического корабля при его движении актуально, целесообразно и важно.

Для измерения возникающих динамических нагрузок от источников бортовых вибровозмущений [6] применяют специальные стенды. Однако на сегодняшний день актуальным является использование методов исследования компьютерное моделирование различных физических процессов.

Если проводить исследования с помощью компьютерного моделирования, то появляется возможность анализировать, проектировать, оптимизировать и прогнозировать поведение реальных конструкций без необходимости создания физического прототипа, что экономит средства и ресурсы [6, 7]. Это важно в сложившихся на сегодняшний день условиях санкционных ограничений [1]:

- на поставку иностранного силоизмерительного оборудования;
- на поставку средств измерений, их метрологическую аттестацию;

– на отсутствие метрологической прослеживаемости уже находящегося в эксплуатации силоизмерительного оборудования;

– на существующий разрыв между технически реализуемым и допустимым уровнем виброактивности источников внутренних возмущений космического аппарата.

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования самого устройства защиты системы электропитания космического аппарата от перенапряжения [8–11] и моделирование испытания этого устройства на виброустойчивость [12].

Моделирование проводилось с использованием программных продуктов САПР P-CAD Schematic и SolidWorks с различным расширением [10].

В программе «P-CAD Schematic» на печатной плате сформирована схема электрическая принципиальная, проведены компоновка и трассировка платы элементами деталей на предусмотренные контактные площадки. В программном расширении «SolidWorks Simulation» создана упрощенная трехмерная геометрическая модель устройства защиты, нанесена конечно-элементная сетка для исследования воздействий на конструкцию вибрации [13]. В работе на этапе конструирования изделия апробировано применение искусственного интеллекта – текстовая программа большой языковой модели (БЯМ или LLM) [14]. Эта модель выступала в роли виртуального ассистента, помогала разобраться в сложной теме.

В таблице представлены результаты исследования виброустойчивости устройства защиты (частотный анализ). Проведение частотного анализа в программе «SolidWorks Simulation» позволило получить изображение изделия с выделением цветом отклонения массы от нормального положения (деформация) по оси OZ (рис. 1).

По шкале деформаций (шкала RESAMP) определены значения максимальной амплитуды вибрации ($A_{\max}$, мм) при различных частотах вибрации (f – частота вибрации, Гц).



Рис. 1. Изображение изделия с выделением цветом отклонения массы от нормального положения (деформация) по оси OZ

Результаты частотного анализа

№ п/п	Частота вибрации f , Гц	Амплитуда вибрации $A_{\max}$, мм	Деформация (отклонение массы)
1	140,42	3,596	0,0093925
2	238,16	5,219	0,0082786
3	352,88	6,246	0,00721556

Определены условия совпадения внешних и внутренних частот вибрации, вызывающие явление резонанса, при котором амплитуды колебаний усиливаются, что может привести к трещинам и разрушениям составных частей и изделия в целом.

Работа выполнена в рамках задания на технический проект АО «НПП «Полус».

Литература

1. К вопросу о повышении диссипативных характеристик конструкции космического аппарата / В.В. Герасимчук, В.В. Ефанов, Д.А. Кузнецов, П.П. Телепнев // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – № 3. – С. 103–110.
2. Влияние вибраций на целевую прецизионную аппаратуру космических аппаратов / В.Я. Геча, В.В. Ефанов, О.П. Клишев, Д.А. Кузнецов и др. // Полет. – 2015. – № 3. – С. 20–24.
3. Ефанов В.В. Межпланетные станции с прецизионной точностью ориентации: требования по обеспечению комплексной виброзащиты / В.В. Ефанов, П.П. Телепнев, Д.А. Кузнецов // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2019. – Т. 53, № 6. – С. 475–480.
4. Клименко Н.Н. Космические системы оптико-электронного наблюдения между прошлым и будущим. – Ч. 1: Трансформация концепции создания и применения космических средств оптикоэлектронного наблюдения на рубеже эпох / Н.Н. Клименко, К.А. Занин // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2024. – № 2. – С. 69–83.
5. Телепнев П.П. Методы виброзащиты прецизионных космических аппаратов / П.П. Телепнев, Д.А. Кузнецов; под ред. В.В. Ефанова. – Химки: Изд. АО «НПО Лавочкина», 2019. – 263 с.

6. Деменко О.Г. К вопросу прогнозирования уровня эксплуатационного ударного нагружения бортовой аппаратуры КА по результатам механических динамических испытаний / О.Г. Деменко, А.С. Бирюков // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2023. – № 4. – С. 37–47.

7. / Архипов М.Ю. К вопросу о численном моделировании динамики конструкции космического аппарата «СПЕКТР-Р» / М.Ю. Архипов, П.П. Телепнев, Д.А. Кузнецов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2014. – № 3. – С. 96–99.

8. Моделирование механических возмущений привода остронаправленной антенны космического аппарата планетных исследований / В.В. Ефанов, В.В. Герасимчук, Д.А. Кузнецов, А.С. Митькин и др. // Полет. – 2017. – № 8. – С. 19–25.

9. Герасимчук В.В. Моделирование вибрационного фона космического аппарата / В.В. Герасимчук, А.В. Жиряков, Д.А. Кузнецов, П.П. Телепнев // Труды МАИ (Москва). – 2023. – № 131. DOI: 10.34759/trd-2023-131-02.

10. Проектирование системы электропитания (СЭП КА). Лекция 18–21 [Электронный ресурс]: офиц. сайт РАНХиГС. – URL: <https://studfile.net/preview/9485392/page:13/> (дата обращения: 01.09.2025).

11. Андреев Ю.А. Проблемы защиты системы электропитания космических аппаратов / Ю.А. Андреев, С.Ю. Буров, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 85–91.

12. ГОСТ 30630.1.2–99. Межгосударственный стандарт. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. – Минск: Изд-во стандартов, 2000.

13. Кондаков А.К. Основы проектирования электронных средств: метод. пособие по курсовому проектированию / А.К. Кондаков, В.Г. Козлов, Ю.П. Кобрин. – Томск: ТУСУР, 2006. – 141 с. [Электронный ресурс]. – <https://edu.tusur.ru/publications/1048> (дата обращения: 15.09.2025).

14. Ikonnikova K.D. Using the capabilities of large language models in improving the educational process / K.D. Ikonnikova, Yu.R. Nikitin, N.B. Voevoda // Mechatronics, Production Technologies, Digital Enterprise: latest success, challenges, trends: International Student Scientific Conference (on-line), Prague, 28 may 2024. – Prague: Ing. Jan Kudláček, Jaroměř, 2025.

Туев Василий Иванович

Д-р техн. наук, проф. каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: tvi_retem@main.tusur.ru

Иконникова Кристина Дмитриевна

Магистрант каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: ikartinka@gmail.com

УДК 628.91

Е.А. Чемоданова, В.С. Якунина, А.О. Лазарева, В.С. Солдаткин

Влияние спектрального состава ФАР на начальные этапы онтогенеза и морфометрические показатели льна масличного

Представлены предварительные результаты исследования влияния различного спектрального состава искусственного освещения на динамику прорастания семян и рост проростков льна масличного. Эксперимент проводился с использованием натриевой лампы высокого давления (ДНаЗ) и двух типов светодиодных облучателей с преобладанием красного спектра. Установлено, что на ранних стадиях развития спектральный состав света оказывает значительное влияние на энергию прорастания и темпы роста растений.

Ключевые слова: лен, ДНаЗ, светодиодные светильники, семена, микрозелень.

Лен масличный, являющийся одной из древнейших сельскохозяйственных культур, продолжает расширять свои позиции в мировом агропроизводстве. Исторически сложившаяся сфера его использования в современном мире кардинально трансформируется, открывая ранее не известные перспективы. Помимо традиционной легкой промышленности, лен нашел применение в качестве ценного компонента в пищевой, косметической, фармацевтической отраслях, а также при производстве строительных материалов и мебели, прочно утвердившись в ключевых сферах человеческой деятельности.

Возделывание льна ориентировано на получение двух основных продуктов: волокна и семян. Последние представляют особую ценность благодаря уникальному биохимическому составу, включающему 35–40% жиров, около 23% белков, 22% безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ), 9% клетчатки, 3% золы и 8% влаги. Наиболее востребованным производным семян является льняное масло, богатое жизненно важными органическими кислотами: альфа-линоленовой (Омега-3), линолевой (Омега-6) и олеиновой (Омега-9). Благодаря своим доказанным лечебно-профилактическим свойствам этот продукт приобрел широкую популярность в диетологии и здоровом питании. Параллельно масло используется в химической промышленности для изготовления лаков, красок, олифы и высококачественного мыла, а также в парфюмерии.

Побочный продукт переработки – жмых – с высоким содержанием протеина (до 25%) и переваримых безазотистых веществ (свыше 30%) является высокопитательной кормовой добавкой для животных. Благодаря насыщенности полиненасыщенными жирными кислотами, пищевыми волокнами и лигнинами, цельные семена льна классифицируются как нутрицевтик – функциональный пищевой продукт, способствующий укреплению здоровья и профилактике заболеваний. Их напрямую добавляют в хлебобулочные изделия, используют в медицине и в качестве корма в птицеводстве и аквакультуре [1].

Высокая рентабельность выращивания льна стимулирует аграриев к повышению эффективности его производства. Ключевым фактором в этом процессе выступает внедрение и возделывание новых,

более продуктивных сортов, что является наименее затратным способом увеличения урожайности. Правильный выбор сорта, максимально соответствующего конкретным производственным условиям, является фундаментом для успешного развития льноводства. Для проведения эксперимента были выбран масличный лен и три вида облучательных установок, а именно: ДНаЗ 250 Вт, Diora Unit Agro, Diora Quadro Agro.

Целью данной работы была оценка воздействия разных источников света с акцентом на длинноволновую область спектра на начальные этапы развития льна масличного.

Методика эксперимента

В проведении эксперимента было выбрано два светодиодных облучателя с разной интенсивностью в красной области спектра – ФАР и облучатель ДНаЗ в качестве контрольного образца (табл. 1) [2].

Таблица 1

Характеристики облучательных приборов

Наименование	ДНаЗ 250 Вт	Diora Unit Agro	Diora Quadro Agro
Потребляемая мощность, Вт	263,8	80,92	113
Поток фотосинтетически активной радиации (PPF), мкмоль/с	302,25	238	248,78
Квантовая эффективность, мкмоль/Дж	1,15	2,94	2,2

На рис. 1 представлены спектральные составы облучательных приборов с учётом необходимого PPFD.

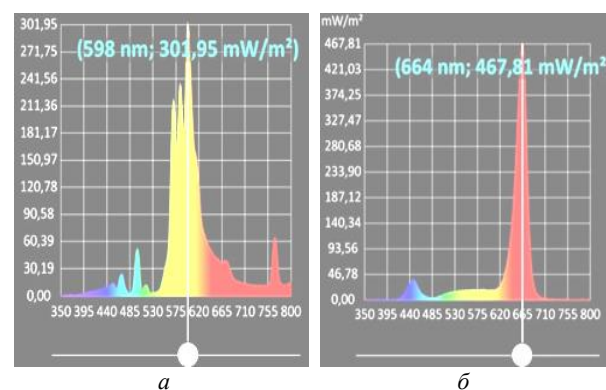


Рис. 1 (начало)

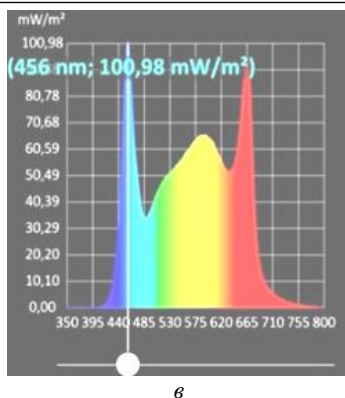


Рис. 1 (окончание). Спектральный состав излучения облучателей: а – ДНАЗ 250Вт; б – Diora Unit Agro; в – Diora Quadro Agro

Условия проведения: эксперимент проводился в следующих условиях: температура воздуха $+25 \pm 3$ °С, относительная влажность 45–80%, фотопериод 12/12 ч. Уровень облученности поддерживался на уровне 200 мкмоль/м²·с. Полив и измерения проводились ежедневно. Всего было заложено 6 контейнеров (по два на каждый тип освещения).

Методы оценки: ежедневно фиксировалось количество проросших семян (всхожесть, шт) и измерялась средняя высота проростков (см).

Результаты эксперимента

Семена льна посажены 12.09.25 в контейнеры по 2 для каждого светильника, после прорастания поставлены под лампы. Замеры начались 18.09.25 и планируют продолжаться. На рис. 2 представлены контейнеры с масличным льном под различным светом.



Рис. 2 (начало)



Рис. 2 (оконание). Контейнеры с масличным льном

Представленные данные (табл. 2) охватывают трехдневный период наблюдений (18.09.2025 – 20.09.2025). На момент последнего замера наибольшее количество проростков было зафиксировано под облучателем Diora Quadro Agro (122 шт.), в то время как под контролем (ДНАЗ) этот показатель составил 75–98 шт.

Таблица 2

Количество проросших семян и их средняя высота

18.09.2025	ДНАЗ 250 Вт		Diora Unit Agro		Diora Quadro Agro	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Кол-во	53	91	95	70	74	115
Средняя высота	3,9	3,6	3,65	3,6	3,25	3,25
19.09.2025	ДНАЗ 250 Вт		Diora Unit Agro		Diora Quadro Agro	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Кол-во	74	95	103	82	82	120
Средняя высота	4,25	4,25	4,25	4,25	3,75	3,75
20.09.2025	ДНАЗ 250 Вт		Diora Unit Agro		Diora Quadro Agro	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Кол-во	75	98	104	83	83	122
Средняя высота	4,7	4,75	4,65	4,8	4,6	4,25

Анализ динамики роста показал, что к 20.09.2025 наиболее высокие показатели средней длины проростков наблюдались в вариантах с лампами ДНАЗ (4,7 см) и Diora Unit Agro (4,8 см). Несмотря на меньшее количество растений, вариант с ДНАЗ показал сопоставимую, а на некоторых повторностях и большую, высоту проростков. Это может быть связано с более сбалансированным спектром натриевой лампы, оказывающим комплексное воздействие на морфогенез. Согласно закону Планка, такая эффективность объясняется большей квантовой эффективностью красных светодиодов, при одинаковой мощности оптического излучения генерируется большее количество квантов красного излучения [3].

Выводы

На начальных этапах онтогенеза льна масличного спектральный состав света оказывает статистически значимое влияние на всхожесть семян и темпы линейного роста проростков. Для комплексной оценки влияния спектра на продуктивность культу-

ры (урожайность) необходимо продолжение эксперимента с фиксацией показателей на всех этапах вегетации, включая формирование генеративных органов и семян. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработки рецептов светодиодного освещения при выращивании льна в условиях защищенного грунта или фитотронов.

Литература

1. Дьяков А.Б. Физиология и экология льна. – Краснодар: Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В.С. Пустовойта, 2006. – 214 с.
2. Сравнение влияния облучательных приборов на рост и урожайность на примере огурцов сорта Мева F1 / Д.В. Былков, Д.А. Полторацкий, В.С. Солдаткин, А.О. Лазарева, А.П. Шкарупо, Е.С. Щепеткин // Фотоника. – 2023 – Т. 17, № 5. – С. 408–419.
3. Закон излучения Планка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/zakon-izlucheniia-planka-fbf0cd> свободный (дата обращения: 20.09.2025).

Чемоданова Ева Алексеевна

Студентка каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: evasport05@yandex.ru

Якунина Виктория Сергеевна

Студентка каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: vakunian243@gmail.com

Лазарева Алена Олеговна

Аспирант каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: alena.o.lazareva@tusur.ru

Солдаткин Василий Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. РЭТЭМ ТУСУРа
Эл. почта: soldatkinvs@main.tusur.ru

Секция 12

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

*Председатели – **Шурыгин Юрий Алексеевич**, директор
департамента управления и стратегического развития
ТУСУРа, зав. каф. КСУП, проф., д.т.н.;
Коцубинский Владислав Петрович,
доцент каф. КСУП, к.т.н.*

А.Е. Карелин, Д.Е. Болбуков

Перспективы применения систем ЧПУ для автоматизации изготовления кабельных жгутов

Рассматривается концепция станка с ЧПУ для автоматизации процесса изготовления кабельных жгутов. Анализируются технологический процесс сборки кабельного жгута, а также существующие решения для упрощения или автоматизации операций, связанных с ним. Приводится возможная конфигурация станка, пригодная для выполнения всех операций для сборки кабельного жгута, представлена 3D-модель такого станка.

Ключевые слова: кабельный жгут, ЧПУ, обработка провода, автоматизация производства.

Современная цивилизация во многом опирается на электронную технику, сегодня невозможно представить себе современное производство, автомобиль или самолёт без множества электронных устройств различного назначения. Однако по отдельности эти устройства не способны выполнять свои функции, для создания работоспособной системы их необходимо соединить с помощью кабельных линий.

Например, для того чтобы на предприятии управлять технологическим оборудованием, необходимо изготовить щит, содержащий ПЛК, блоки преобразования сигналов, промежуточные реле и многое другое оборудование. Значительная часть трудозатрат выпадает именно на изготовление кабельных жгутов, соединяющих устройства. Работник должен отмерить, отрезать, обжать наконечники, промаркировать кабель, и всё это требует времени, а также может приводить к ошибкам и браку. Аналогично и в автомобильной, авиационной и космической отрасли сборка кабельных жгутов является трудоёмкой операцией.

На сегодняшний день для упрощения и ускорения сборки кабельных жгутов применяют специальные рабочие места (плазы) [1], оснащенные шаблонами или проекторами для отображения конфигурации жгута, а также специальными дозаторами провода и полуавтоматическими устройствами для обработки концов провода, упрощающими его размотку и нарезку. Помимо этого, при изготовлении больших партий одинаковых кабельных жгутов применяют станки, выполняющие автоматическую нарезку провода и обжим наконечников нужного типа, далее подготовленные провода в жгут собирает человек. Такой подход позволяет достаточно упростить сборку кабельных жгутов, однако слабо применим при изготовлении единичных или мелкосерийных жгутов, поскольку издержки связанные с переналадкой оборудования, покрывают экономию времени при работе.

Описанные ранее методы свойственны автомобильной или аэрокосмической промышленности, в области промышленной автоматизации на сегодняшний день кабельные линии собирают зачастую по месту прямо в кабельных лотках, установленных в щите. Это устоявшаяся практика, поскольку щиты промышленной автоматизации редко являются идентичными, так как проектируются под конкрет-

ное предприятие и технологический процесс, что, по сути, делает их штучным изделием.

Технология изготовления штучных изделий

Сегодня для изготовления уникальных штучных изделий широкое распространение получили различные станки с ЧПУ: 3D-принтеры, станки лазерной резки, фрезерные и токарные станки. Причина их распространения в том, что они позволяют изготовить уникальную деталь по её компьютерной модели в очень короткие сроки и с низкими затратами. Например, 3D-печать позволяет получить прототип в течение нескольких часов с низкими трудовыми затратами и низким порогом входа.

Мы считаем, что такой подход может быть применён и для мелкосерийного и единичного изготовления кабельных жгутов. Это возможно, поскольку при проектировании современных щитов, транспорта и других объектов применяются различные САПР-системы, уже имеющие возможности для компоновки электронных компонентов, а также описания кабельных линий и жгутов, например, дополнение Комас-3D «Оборудование: кабели и жгуты 3D» (рис. 1). Таким образом, уже выполняется большая часть работы по созданию компьютерной модели по которой возможно выполнить сборку такого жгута. Остаётся задача создания программного комплекса, позволяющего по модели, выполненной в САПР, построить управляющую программу для ЧПУ станка, способного собрать кабельный жгут необходимой конфигурации в соответствии с ГОСТами, регламентирующими технические требования к жгутам [2] и маркировку проводников [3].

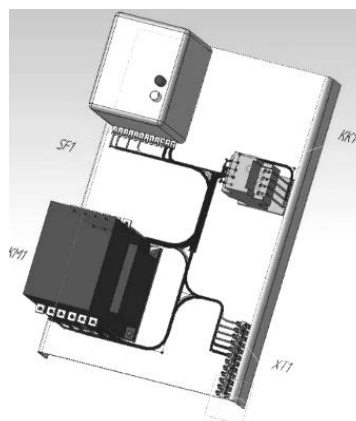


Рис. 1. Пример модели щита, выполненной в «Компас-3D»

Технологический процесс сборки жгута

Процесс изготовления кабельного жгута можно представить как циклический набор операций по изготовлению одного провода и установки его в проектное положение. Таким образом, при ручном изготовлении выполняются следующие операции:

1. Отрезание провода в размер.
2. Зачистка концов провода от изоляции.
3. Обжим концов провода наконечниками.
4. Маркировка провода.
5. Формовка провода и укладка в жгут.

При выполнении первых четырех операций рабочий использует ручные инструменты, полуавтоматические станки для установки наконечников [4], резки провода [5] или маркировки [6]. То есть задача человека – перемещать провод между устройствами, что можно довольно просто автоматизировать.

Пятая операция значительно сложнее, и на сегодня нет средств для её автоматизации. Это связано с тем, что провод при укладке вследствие своей гибкости и упругости может иметь непредсказуемую форму, а так как таких проводов в жгуте много, то при их укладке нужно не просто уложить провод, а ещё и следить за тем, чтобы ранее уложенные провода также не смещались или не выталкивались из жгута. Это обстоятельство приводит к использованию сегодня различных зажимов и шаблонов, установка которых требует переналадки и отнимает время при сборке разнообразных жгутов.

Решением этой проблемы могут являться унифицированные зажимы, которые могут быть установлены произвольно на рабочем поле станка посредством резьбового крепления. А также укладка не всего провода целиком, а его раскладка от одного конца к другому. Так как зажимы унифицированы и располагаются в рабочей зоне станка они могут быть также установлены самим станком, а их положение рассчитано на основании компьютерной модели жгута.

Механика ЧПУ станка

Поскольку кабельные жгуты, как правило, имеют значительную протяженность и от основной ветви выполняются ответвления к конкретным устройствам, логично выбрать станок на основе декартовой кинематики, выполненный по схеме с подвижным порталом. Такой выбор позволяет легко перепроектировать станок под требования заказчика посредством удлинения его станины и, соответственно, хода его портала. Например, для изготовления щитов промышленной автоматики жгуты, как правило, имеют длину, сопоставимую с размерами щита, т.е. до 2–3 м, а в случае изготовления жгутов для автомобильной или авиационной промышленности длина жгутов может достигать до десятков метров. Соответственно, площадь рабочей зоны станка должна позволять разложить собираемый жгут.

Помимо позиционирования инструмента на рабочем поле по линейным осям (оси X , Y , Z), необходимо при раскладке провода поворачивать инструмент относительно оси, перпендикулярной рабочему

столу (ось A). Также необходимо подавать провод по ходу движения инструмента для обеспечения правильного его натяжения, эту задачу можно решить применением привода (ось E) и подающего механизма, аналогичного механизму подачи прутка для 3D-принтера или сварочной проволоки в сварочных полуавтоматах (MAG- или MIG-сварка).

Также необходимы устройства для отрезания, зачистки провода, обжима наконечников и маркировки. Эти устройства должны быть закреплены рядом с рабочим инструментом, поскольку в противном случае конец провода, в направлении которого ведётся укладка, будет невозможно обработать, либо возникнут серьёзные ограничения на длину незакреплённого конца провода. Эти устройства могут быть собраны в компактные корпуса и размещены в виде револьверной головки (ось B) на каретке оси Z , движущейся по portalу станка, таким образом, достаточно приподнять инструмент от рабочего поля, и конец кабеля уже находится рядом с устройством по его обработке. Для обеспечения работоспособности нужны как минимум следующие устройства:

1. Резак провода.
2. Устройство для зачистки провода.
3. Обжимное устройство для наконечников, в зависимости от типа наконечника могут применяться различные матрицы и подающие устройства, в том числе содержащие различные профили одновременно.
4. Маркиратор провода.

Для позиционирования устройства для обработки провода относительно вылета провода из инструмента нужен ещё один привод (ось V), перемещающий револьверную головку вдоль оси провода.

Обработка конца провода, с которого начинается укладка, не представляет проблемы, поскольку он свободно торчит из инструмента, и ничто не ограничивает его перемещение, однако второй конец провода ограничен в подвижности последним фиксатором жгута, в который он зажат, а также требуется сперва отрезать его от остального провода и развернуть обратную сторону (поскольку изначально в сторону устройств для обработки провода направлен передний конец). Для решения данной задачи предполагается оснастить конец укладчика провода управляемым зажимом (ось C), способным после отреза развернуть провод и направить его в устройства для его обработки.

Ранее уже было сказано об фиксации кабельного жгута и раскладке провода, однако не был рассмотрен вопрос влияния типа провода или кабеля, а также его формы и изоляции на процедуру его укладки. Форма провода значительно влияет на процесс его укладки и требует подстройки формы рабочего инструмента, способа подачи провода и других параметров. По этой причине логично сделать инструмент, выполняющий раскладку провода сменным аналогично решениям сменных печатающих головок 3D-принтеров для мультиматериальной печати [7].

Также это позволит создавать вспомогательные инструменты, предназначенные для фиксации готового жгута при помощи стяжек или кабельной ленты, расстановки фиксаторов и других операций.

Таким образом, минимально для реализации такого ЧПУ станка без учета устройств для обра-

ботки концов кабеля необходимо четыре линейных оси – X, Y, Z, V и четыре вращательных – A, B, C, E .

3D-модель предлагаемого станка

На текущий момент разработана 3D-модель описываемого станка (рис. 2). Также был сконструирован рабочий инструмент станка для укладки кабеля (рис. 3) и изготовлен его прототип (рис. 4).

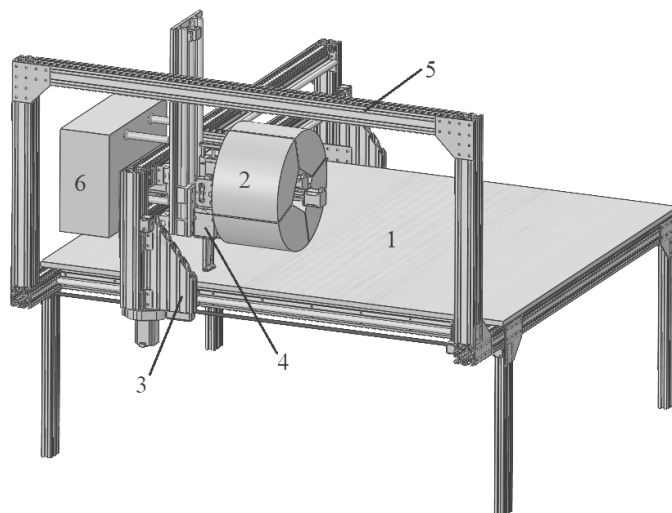


Рис. 2. 3D-модель предлагаемого станка: 1 – рабочее поле, 2 – револьверная головка устройств для обработки провода, 3 – подвижный портал станка, 4 – рабочий инструмент, 5 – балка для парковки сменных рабочих инструментов, 6 – щит для электроники управления револьверной головкой и рабочим инструментом

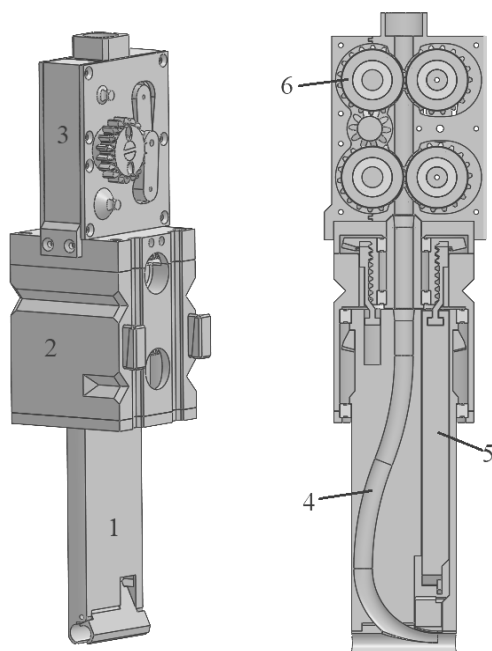


Рис. 3. Инструмент для раскладки провода с подающим механизмом: 1 – рабочий инструмент, 2 – корпус с выступами для автоматической смены инструмента, 3 – подающий механизм, 4 – канал для провода, 5 – привод зажима провода, 6 – ролики подающего механизма

Данный прототип позволяет производить укладку проводов круглого сечения диаметром от 1 до 8 мм, проверена работоспособность прототипа с проводом ПУГВ сечением проводника от 0,5 до 1,5 мм².

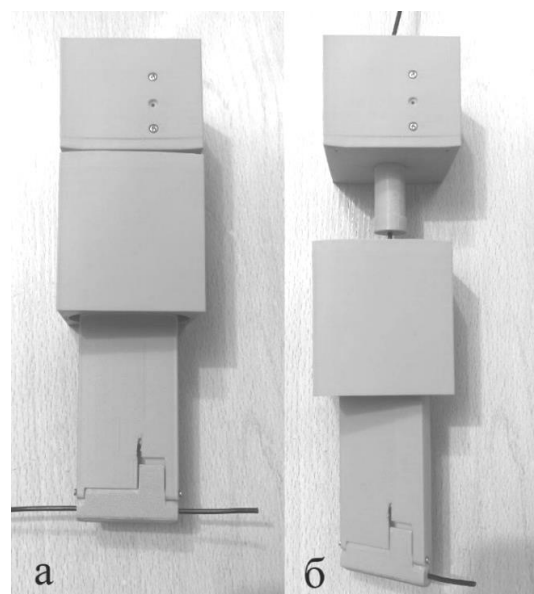


Рис. 4. Прототип инструмента для раскладки провода: а – фиксация заднего конца провода, б – подача и раскладка провода

Заключение

В результате можно сказать, что создание ЧПУ станка для автоматизации сборки кабельных жгутов возможно, однако требует дальнейшей проработки и проведения работ по разработке как механических элементов станка, таких как фиксаторы жгута, рабочие инструменты для различных задач, устройства для обработки концов провода, так и программного обеспечения, включающего алгоритмы построения

траектории, поддержания необходимого натяжения провода, определения точек для установки фиксаторов жгута и порядка укладки проводов в жгуте.

Литература

1. Горбач А. Тенденции и пути развития современного жгутового производства для изделий специального назначения предприятий ВПК России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – № 95. – С. 84–87.
2. ГОСТ 23586–96. Монтаж электрический радио-электронной аппаратуры и приборов. Технические требования к жгутам и их креплению. – Введ. 1996. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 19 с.
3. ГОСТ Р 50509–93. Маркировка изолированных проводников. – Введ. 1994. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 16 с.
4. Полуавтоматический станок KS-A5010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://provod-cabel.com/product/poluavtomaticheskij-standok-ks-a5010>, свободный (дата обращения: 15.09.2025).
5. Автоматическая машина для резки и зачистки проводов KS-09C [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://provod-cabel.com/product/avtomaticheskaya-mashina-dlya-rezki-i-zachistki-provodov-ks-09c-2>, свободный (дата обращения: 15.09.2025).

6. Маркиратор S-700 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://provod-cabel.com/product/markirator-s-700>, свободный (дата обращения: 15.09.2025).

7. Репозиторий проекта StealthChanger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/DraftShift/StealthChanger>, свободный (дата обращения: 15.09.2025).

Карелин Алексей Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: aleksei.e.karelin@tusur.ru

Болбуков Данил Евгеньевич

Магистрант каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: daniil_bolbukov@mail.ru

П.И. Андреев, Д.П. Долгополов, Е.А. Нетесова, Ю.О. Лобода

Электромиография: принципы, проблемы и применение в робототехнике

Рассматривается метод электромиографии (ЭМГ), её виды и применение в области медицины и робототехнике, а также проблемы регистрации и обработки ЭМГ-сигналов.

Ключевые слова: электромиография, миодатчики, робототехника, анализ сигналов, управление протезами.

Электромиография (ЭМГ) – это методика регистрации электрической активности мышц, возникающей в результате их нервной стимуляции. Эти электрические сигналы, генерируемые мышечными волокнами при сокращении, отражают функциональное состояние мышц и нервной системы. ЭМГ широко используется в медицине для диагностики заболеваний нервно-мышечной системы, а также в биомедицинской инженерии и робототехнике для создания интерфейсов «человек–машина». Благодаря способности считывать активность мышц, ЭМГ позволяет управлять протезами, экзоскелетами и роботами, обеспечивая естественное и интуитивное взаимодействие.

Миодатчики и виды ЭМГ

Для регистрации ЭМГ-сигналов применяются специальные датчики – миодатчики, которые фиксируют электрические потенциалы, возникающие при мышечной активации. Существует два основных способа регистрации:

Внутримышечная (инвазивная) ЭМГ

Этот метод предполагает введение игольчатых или тонкопроволочных электродов непосредственно в мышечную ткань. Игольчатые электроды бывают нескольких типов: монополярные, одноволоконные и concentрические, каждый из которых позволяет получить специфическую информацию о состоянии отдельных мышечных волокон и двигательных единиц. Внутримышечная ЭМГ обеспечивает высокую точность и локализацию сигнала, что особенно важно при диагностике заболеваний, таких как миопатии, невропатии, или при исследовании двигательных паттернов. Однако этот метод требует квалифицированного специалиста и является инвазивным, что ограничивает его применение в повседневных задачах.

Поверхностная (неинвазивная) ЭМГ

Этот способ основан на регистрации электрической активности мышц с поверхности кожи с помощью электродов, которые могут быть гелевыми или сухими. Поверхностные электроды фиксируют суммарную активность множества мышечных волокон, что делает этот метод менее точным, но более удобным и безопасным для длительного мониторинга. Поверхностная ЭМГ широко применяется в реабилитации, спортивной медицине и робототехнике, где необходим непрерывный и неинвазивный контроль мышечной активности. Принцип работы основан на электролитической проводимости между

кожей и мышцами, а также на способности тканей проводить электрические потенциалы.

Каждый из этих видов ЭМГ имеет свои преимущества и ограничения. Внутримышечная ЭМГ – более точная и специфичная, но инвазивная и сложная в применении. Поверхностная ЭМГ – удобна и безопасна, но подвержена влиянию внешних факторов и шумов.

Физиологическая основа ЭМГ-сигналов

Мышцы состоят из множества мышечных волокон, которые управляются двигательными нейронами спинного и головного мозга. При поступлении нервного импульса происходит деполяризация мембран мышечных волокон – изменение электрического потенциала, вызывающее сокращение мышцы. Этот процесс сопровождается возникновением электрического поля, которое распространяется по мышце и окружающим тканям.

Человеческое тело в целом является электрически нейтральным, однако на уровне клеточных мембран существует разница потенциалов, обусловленная неравномерным распределением ионов (натрия, калия, хлора). Именно эти потенциалы и регистрируются электродами ЭМГ. Амплитуда сигналов зависит от типа мышечных волокон (быстрые или медленные), уровня их активации, а также от физиологических особенностей человека, таких как толщина подкожного жира, состояние мышц и их утомляемость.

ЭМГ-сигналы являются суммарными потенциалами действия множества двигательных единиц – совокупностей одного мотонейрона и всех иннервируемых им мышечных волокон. При сокращении мышцы активируются разные двигательные единицы с различной частотой, что отражается в сложности и вариативности ЭМГ-сигнала.

Проблемы и источники шумов при регистрации ЭМГ

Регистрация ЭМГ-сигналов сопряжена с рядом технических и физиологических проблем, которые влияют на качество данных:

Низкая амплитуда сигнала

Электрические потенциалы мышечной активности обычно имеют амплитуду в пределах нескольких милливольт, что делает их уязвимыми к шумам и помехам.

Шумы оборудования

Электронные компоненты усилителей и аналоговых преобразователей вносят собственный шум,

который необходимо минимизировать за счет качественной аппаратуры и правильной настройки.

Электромагнитные помехи

Внешние источники, такие как электропитание, мобильные телефоны, бытовые приборы, создают электромагнитные поля, которые могут значительно превышать уровень ЭМГ-сигнала. Для борьбы с этим применяют экранирование кабелей, заземление и специальные фильтры.

Артефакты движения

При движении электродов относительно кожи или при растяжении мышц возникают механические артефакты, которые проявляются в виде резких искажений сигнала. Использование крепежных лент, эластичных бинтов и оптимальное расположение электродов помогает снизить эти помехи.

Физиологические вариации

Изменения температуры кожи, уровень гидратации, состояние мышц и даже эмоциональное состояние могут влиять на стабильность и амплитуду ЭМГ-сигнала.

Для улучшения качества сигнала важно учитывать эти факторы при подготовке к измерениям и в процессе обработки данных.

Обработка и анализ ЭМГ-сигналов

Для выделения полезной информации из ЭМГ-сигнала применяют комплекс методов обработки:

Усиление и фильтрация

Сигнал усиливается с помощью прецизионных усилителей с высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала. Применяются полосовые фильтры для выделения диапазона частот, характерного для мышечной активности (обычно 20–450 Гц), и удаления низкочастотных и высокочастотных шумов.

Выпрямление и усреднение

Для анализа амплитуды сигнала используют выпрямление (полное или двухполупериодное) и вычисление среднего абсолютного значения (MAV) или среднеквадратичного значения (RMS). Эти параметры отражают интенсивность мышечной активности.

Машинное обучение и распознавание паттернов

Современные системы используют алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети, метод опорных векторов и глубокое обучение, для классификации жестов и команд по ЭМГ-сигналам. Обучение моделей проводится на базе данных конкретного пользователя, что повышает точность распознавания до 99% и выше.

Временной и частотный анализ

Используются методы спектрального анализа (например, преобразование Фурье или вейвлет-анализ) для выявления особенностей сигнала в различных временных и частотных диапазонах.

Применение ЭМГ в робототехнике

ЭМГ-сигналы нашли широкое применение в управлении роботизированными системами, обеспечивая естественный интерфейс между человеком и машиной. Основные направления использования:

Бионические протезы

ЭМГ-сигналы мышц остатка конечности используются для управления движениями протеза, например, сгибанием или разгибанием пальцев. Это позволяет пользователю интуитивно контролировать протез, восстанавливая функциональность утраченного органа.

Экзоскелеты

В экзоскелетах ЭМГ-сигналы служат для поддержки и усиления движений пользователя, помогая при реабилитации или увеличении физической силы. Пропорциональное управление позволяет регулировать усилия и скорость движения в зависимости от степени мышечной активации.

Гуманоидные роботы и мобильные платформы

Например, робот NAO или платформы на базе LEGO Mindstorms могут управляться с помощью ЭМГ-сигналов, что расширяет возможности интерактивного обучения и развлечений, а также исследований взаимодействия человека и робота.

Системы управления делятся на два типа:

Командное управление

Каждому паттерну мышечной активности соответствует определенная команда (например, поднять руку, повернуть голову). Это упрощает управление дискретными функциями.

Пропорциональное управление

Уровень мышечного напряжения напрямую влияет на скорость, силу или угол движения, обеспечивая более плавное и естественное взаимодействие.

Для повышения надежности управления применяют многоканальную ЭМГ регистрацию, интеграцию с другими сенсорами (акселерометры, гироскопы), а также адаптивные алгоритмы, учитывающие индивидуальные особенности пользователя.

Заключение

Электромиография является мощным инструментом для изучения и использования нервно-мышечной активности человека. Несмотря на технические сложности, связанные с низким уровнем сигнала и помехами, современные методы обработки и алгоритмы машинного обучения позволяют эффективно использовать ЭМГ-сигналы для управления роботизированными устройствами. Это открывает новые горизонты в реабилитации, протезировании, спортивной медицине и человеко-машинном взаимодействии. Развитие технологий электродов и аналитических методов обещает сделать ЭМГ ещё более доступной и точной методикой в будущем.

Литература

1. Полное руководство по датчикам ЭМГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ic-components.ru/blog/how-emg-sensors-improve-diagnosis, rehabilitation, and-prosthetics.jsp>, свободный (дата обращения: 18.09.2025).
2. Как работают датчики в робототехнике и зачем они нужны? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://kurshub.ru/journal/blog/kak-rabotayut-datchiki-v-robototekhnike-i-zachem-oni-nuzhny/>, свободный (дата обращения: 18.09.2025).

3. Методы анализа сигналов ЭМГ: обнаружение, обработка, классификация и применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1455479/#:~:text=EMG%20stands%20for%20electromyography, is%20the%20muscle%20action%20potential,> свободный (дата обращения: 18.09.2025).

4. Обзор получения и обработки электромиографических сигналов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7755956/#:~:text=Electromyography%20\(EMG\)%20is%20a%20technique, bio mechanics%20of%20any%20animal%20movements5. Top 11 water quality sensors for water treatments easily,](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7755956/#:~:text=Electromyography%20(EMG)%20is%20a%20technique, bio mechanics%20of%20any%20animal%20movements5. Top 11 water quality sensors for water treatments easily,) свободный (дата обращения: 18.09.2025).

Андреев Павел

Студент каф. управления инновациями (УИ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: andreev.pavel2004@gmail.com

Долгополов Данил Петрович

Студент каф. компьютерных систем в управлении
и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Эл. почта: dolgopolovdanila41@gmail.com

Нетесова Елизавета Алексеевна

Студентка каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: netesova,elizaveta@bk.ru

Лобода Юлия Олеговна

Канд. пед. наук, доцент каф. УИ ТУСУРа
Эл. почта: yulloboda@gmail.com

Д.П. Ефимов, С.А. Юренская

Использование искрового генератора в борьбе с беспилотными летательными аппаратами

Высокая сложность в отражении атак беспилотных аппаратов заключается в том, что композитные элементы конструкции БПЛА, а также их полет с небольшой скоростью и на низкой высоте значительно усложняют их перехват, но возможность их глушения или вывода электроники из строя возможны. Создав непроницаемый защитный купол из мощных электромагнитных помех, можно уничтожить воздушную цель задолго до ее появления в зоне видимости. Система также способна решить еще одну проблему – сократить стоимость средств ликвидации БПЛА. Как известно, в настоящее время относительно дешевая ракета ПВО стоит как десять БПЛА, которые она может сбить. Представленная автором система подавления позволяет достаточно простым и дешевым способом глушить один или несколько выбранных целей одновременно. При достаточно высокой мощности выходного сигнала на борту атакованного летательного аппарата сгорает электронное оборудование, происходит потеря связи со спутником и управляющим им оператором.

Ключевые слова: спиральные антенны, электрическая дуга, сектор излучения, БПЛА, мощность излучения.

В современных условиях ведения боя и защиты мирного населения средства подавления и ликвидации беспилотных летательных аппаратов играют важную роль в системах защиты воздушного пространства от нежелательных воздушных угроз. В настоящее время, когда БПЛА становятся все более доступными, необходимо иметь эффективные средства для предотвращения воздушных угроз и гарантии полной безопасности людей и важных объектов инфраструктуры государства.

Нейтрализовать БПЛА можно через воздействие на средства глушения управлявшего радиосигнала и выведение бортовой электроники из привычных режимов работы. Такие системы генерируют излучение мощного белого шума, что забивает весь приемный диапазон БПЛА и мешает правильной работе бортовых систем.

Разрабатываемая нами система сверхширокополосного подавления обеспечит глушение сигнала на всем диапазоне частот, что гарантированно нейтрализует БПЛА и защитит объект. Высокомощный искровой излучатель способен создать непреодолимую полосу для беспилотного аппарата, а широкополосная антенна обеспечит передачу всей вырабатываемой мощности на выбранную цель. Достаточно простая схема устройства обеспечивает сравнительно небольшую стоимость и высокую надёжность. Широкополосные свойства излучения электрической дуги гарантируют, что сверхширокополосная система сможет обеспечить шумовое подавление любого сигнала, который будет подаваться на беспилотный аппарат.

Рассматривая глубже направление именно электромагнитного подавления, нельзя упустить уникальные свойства электрической дуги, которая генерирует электромагнитное излучение во всем спектре радиоволн. Известно, что реальное излучение выше, чем мы можем представить или увидеть по обычным приборам. Дело в том, что около 70% лучевой энергии выделяется в виде радиоволн, а остальное рассеивается в виде тепла и видимого света [2]. Как видно на рис. 1, спектр излучения сварочной дуги

охватывает широкий диапазон, что подтверждает возможность равномерного излучения при настройке импульсов.

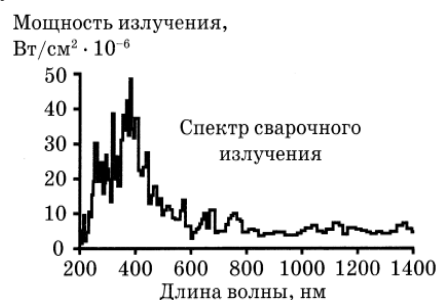


Рис. 1. Спектр излучения сварочной дуги

Спектр радиоизлучения включает в себя короткий, средневолновый и высокочастотный диапазон, захватывая длинноволновый спектр видимого света. При радиоглушении от среднего и коротковолнового излучения могут спасти только правильно подобранные экраны и системы защиты. Это крайне опасное излучение для электронных систем, поскольку может проникать в любые щели и создавать критичные поломки в бортовой электронике, несмотря на надежность, заложенную в них при производстве. Опытные радиотехники знают, что от высоких частот крайне сложно защититься, особенно когда они направлены прямо на летательный объект. Следовательно, производители БПЛА не смогут экранировать бортовую электронику от такого коротковолнового излучения, так как в таком случае придется собирать очень тяжёлый и дорогой аппарат.

Принцип работы искрового генератора (шумогенератора) заключается в облучении беспилотного аппарата, движущегося в зоне действия установки, различными помехами. Эти волны вносят хаос в работу электроники и мешают дальнейшему полету. Микроволновое (СВЧ) излучение атакует БПЛА во время полета, заставляя электронные наводки вращаться с частотой в миллионы раз в секунду, создавая значительные потенциалы-наводки, которые и выводят электронику из строя, создавая перенапря-

жение [1]. Уничтожение происходит за счет двух физических механизмов: появления высоковольтных наводок и образования стоячих СВЧ-волн. На рис. 2 показана простая схема генератора, где разряд через

искровики создает мощные электромагнитные возмущения, которые передаются на антенну, т.е. помехи.

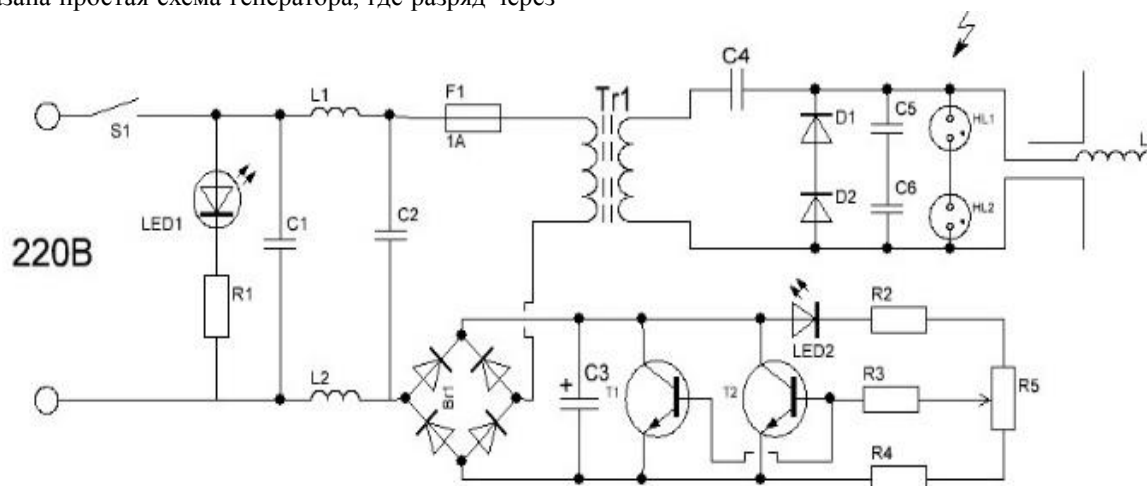


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема шумогенератора

При выборе СВЧ-антенны с широким спектром излучения следует ориентироваться на ее основные характеристики, главная из которых – усиление антенны. Объем передаваемого в эфир излучения определяется излучаемой мощностью и, следовательно, максимальной дальностью работы установки.

Спиральные антенны

Под эффективностью антенны понимается совокупность ее свойств, характеризующих рабочие качества разработанной системы. Важным узлом, определяющим его возможности, является широкополосность антенны, способной излучать сигналы как в метровом, так и в сантиметровом диапазоне радиоволн. В качестве такой антенны для шумогенератора можно выбрать спиральную логарифмическую антенну.

Конструкция логоспиральной антенны включает спираль и трансформатор, но можно подключить ее через согласующую индуктивность в виде треугольного отрезка меди. Несмотря на простоту в изготовлении, такая система будет хорошо выполнять свои функции. Сама антенна представляет собой металлические полоски, намотанные на диэлектрический конус. Такая форма спиральных вибраторов обеспечивает широкую полосу, а также широкий угол однонаправленного излучения с круговой поляризацией в направлении от основания до вершины конуса.

Особенностью логоспиральной антенны является то, что ширина плеча увеличивается, начиная от точки питания в вершине конуса в логарифмической зависимости. Диаграмма направленности логоспиральной антенны зависит от величины угла при вершине конуса и угла намотки спирали антенны. Диапазон рабочих частот такой антенны не ограничен по частотам [3]. Следовательно, можно сделать антенну с полосой пропускания от 1 МГц до 5 ГГц, которая будет одинаково хорошо работать на всех

частотах. Такая антенна идеально подойдет для передачи мощности от искрового генератора, обеспечивая круговую поляризацию.

Заключение

Системы радиоподавления – это пассивные системы, которые могут обнаруживать БПЛА и уничтожать их электромагнитным излучением через уязвимые места – выступающие и незащищенные участки электросети, через которые можно вмешаться в их работу. На них попадает сильное магнитное излучение и выводит электронику из строя, создавая высоковольтные наводки. Таким образом, разработка подобных систем способна обеспечить эффективную защиту от БПЛА в современных условиях, включая приграничные области России и территории, где ведется СВО.

Литература

1. Петровская М.Р. Состояние и перспективы развития средств защиты от БПЛА / М.Р. Петровская, А.В. Лысов // Защита информации. Инсайд. – 2020. – № 3. – С. 78–81.
2. Алтунин Д.М. Способы защиты от беспилотных летательных аппаратов // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 32. – С. 1032–1036.
3. Короткова Л.А. и др. Спиральные антенны // Интернаука. – 2021. – Т. 9, № 185, ч. 1. – С. 72.

Ефимов Денис Павлович

Студент Технологического университета
им. А.А. Леонова, ККМТ
Эл. почта: edp.5kv@mail.ru

Юренская Светлана Алексеевна

Преп. Технологического университета
им. А.А. Леонова, ККМТ
Эл. почта: yurenskaya.sa@ut-mo.ru

Е.С. Глибин, А.В. Прядилов, Е.Д. Денисова, Л.И. Буйлов

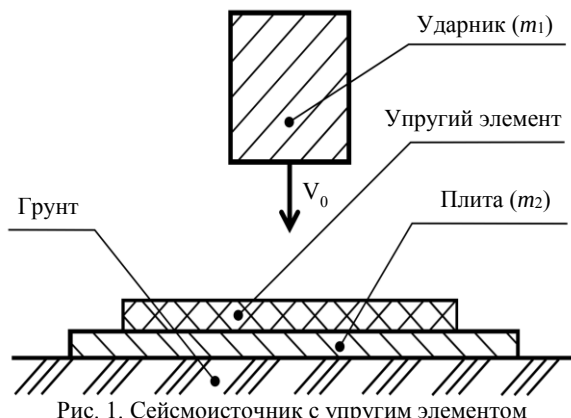
Применение метода электромеханических аналогий при моделировании работы сейсмоисточника в SimInTech

Рассматривается модель эквивалентной электрической цепи, которая получена дуальным перестроением механической цепи источника сейсмического сигнала в соответствии с системой электромеханических аналогий «сила – напряжение».

Ключевые слова: электромеханические аналогии, сейсморазведка, импульсный сейсмоисточник, SimInTech.

Нефтегазовая промышленность является главным источником энергии в мире и способствует росту экономики. Невзрывная сейсморазведка является предпочтительным методом при поиске полезных ископаемых и снижает экологическую нагрузку [1]. Регионы Арктики и Сибири с суровым климатом предъявляют особые требования к технологиям, процессам и оборудованию, что затрудняет геологоразведочные работы. Повышение удельных массогабаритных показателей новых источников сейсмического воздействия (отношение развиваемого усилия на грунт к массе источника) позволит увеличить мощность одного транспортно-разведочного комплекса и снизить эксплуатационные расходы.

Направлением улучшения массогабаритных показателей источников сейсмического сигнала представляется использование режима частично упругого удара (рис. 1).



Сейсмические волны образуются путем воздействия на грунт импульсом, создаваемым ударником массой m_1 с начальной скоростью V_0 . Ограничивающим фактором при генерации сейсмических волн является максимальная скорость вертикальных деформаций, примерно равная 1–2 м/с [2]. При её превышении энергия воздействия затрачивается на разрушение грунта. Ударник падает не непосредственно на грунт, а на излучающую плиту массой m_2 . Плита обеспечивает равномерность механических нагрузок на грунт, снижает скорость и увеличивает площадь воздействия. Между плитой и ударником размещен упругий элемент, например, из полиуретана. Для исследования процесса преобразования

энергии сейсмоисточника в энергию упругих деформаций грунта с целью выбора оптимальных параметров конструктивных элементов выполнено моделирование в программе SimInTech [3].

Механическая цепь со средоточенными параметрами сейсмоисточника (рис. 2) включает ударник массой m_1 , на который действует сила тяжести P_{g1} .

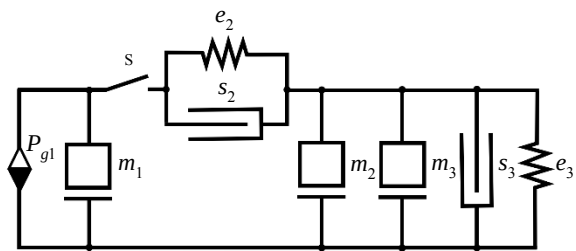


Рис. 2. Механическая цепь сейсмоисточника

С помощью элемента s_2 моделируется упругость, а с помощью e_2 – вязкое трение упругого элемента. Излучающая плита представлена элементом m_2 , а грунт совокупностью элементов m_3 , e_3 , s_3 . Переключатель S замкнут в начальный момент удара и размыкается в момент, когда сила взаимодействия между ударником и упругим элементом меняет знак на противоположный, обеспечивая отрыв ударника от упругого элемента.

Звенья цепи соединяются последовательно (например, ударник – упругий элемент), если каждое звено «тянет» за собой следующее. Параллельно соединяются звенья, которые действуют на одну и ту же точку.

Электрическая цепь-аналог (рис. 3) получена дуальным перестроением механической цепи в соответствии с системой электромеханических аналогий «сила – напряжение» [4]. Так, массе ударника $m_1=10$ кг соответствует индуктивность $L_1=10$ Гн, массе плиты $m_2=5$ кг соответствует индуктивность $L_2=5$ Гн, а массе присоединенного грунта $m_3=25$ кг – $L_3=25$ Гн. Начальная скорость удара V_0 , равная 4 м/с, определяет начальный ток индуктивности $L_1 = -4$ А. С помощью источника ЭДС $E_1=98$ В моделируется сила тяжести $P_{g1} = m_3g$, где g – ускорение свободного падения $9,8$ м/с². Податливости $s_2=10^{-7}$ м/Н соответствует емкость конденсатора C_2 , равная $0,1$ мкФ, а коэффициенту вязкого трения $e_2=2000$ Н/(м/с) в цепи-аналоге соответствует сопротивление $R_2 = 2000$ Ом. Аналогично выбраны номи-

налы элементов в модели грунта $R3$, $C3$ для $e_3=10000$ Н/(м/с) и $s_3=10^{-7}$ м/Н. Последовательное соединение звеньев в механической цепи соответствует параллельному соединению в электрической цепи-аналоге и наоборот.

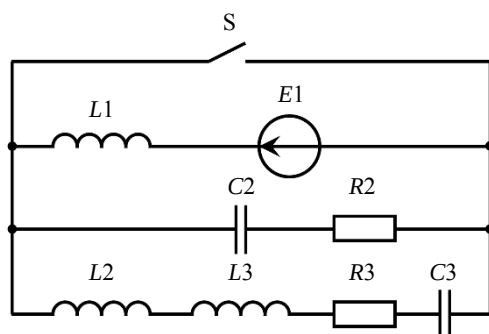


Рис. 3. Электрическая цепь-аналог сейсмоисточника в системе электромеханических аналогий «сила – напряжение»

Скриншот модели электрической цепи в программе SimInTech представлен на рис. 4. В модель включены измерительные блоки, средства отображения и элементы управления переключателем S. Так, ток индуктивности $L1$, который соответствует скорости движения ударника, измеряется с помощью амперметра и сохраняется в списке сигналов программы как $v1$. Аналогично измеряется ток элементов $L2$, $L3$ (скорость движения плиты и грунта) и сохраняется в виде сигнала $v2$. Дополнительно сигналы $v1$, $v2$ интегрируются по времени для определения перемещения элементов сейсмоисточника и определяются минимальные и максимальные значения.

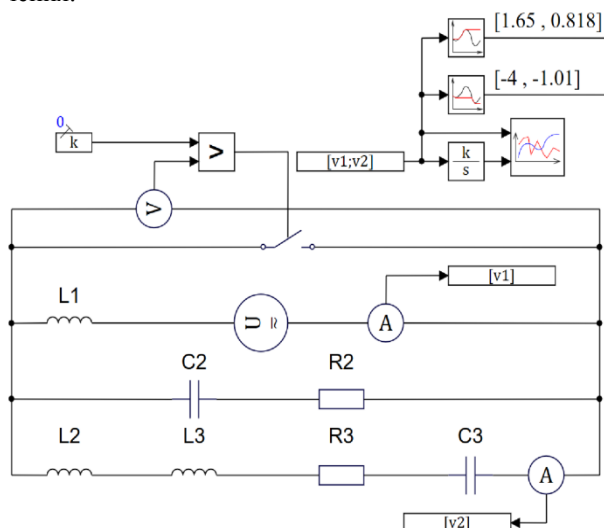


Рис. 4. Скриншот модели в SimInTech

Результаты моделирования в виде временных диаграмм скоростей (V_1 , V_2) и перемещения (x_1 , x_2) ударника и излучающей плиты показаны на рис. 5. Видно, что максимальная скорость смещения излучающей плиты составляет 1,01 м/с, что ниже типовых значений максимальной скорости вертикальных деформаций грунта.

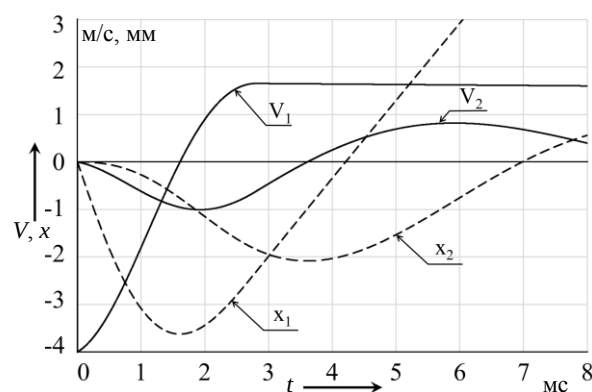


Рис. 5. Результаты моделирования

Таким образом, разработанная электрическая цепь-аналог позволяет использовать единые методы моделирования как механической части сейсмоисточника, так и электрической системы питания и электронной системы управления. Модель позволяет применять одинаковое программное обеспечение, а также является способом проверки численных расчетов систем уравнений, описывающих механическую систему.

Работа выполнена в рамках тематики по государственному заданию № FEMR-2024-008.

Литература

1. Pulsed Electromechanical Drives for General Industrial Use / K.Kh. Uzbekov, A.V. Priyadilov, E.S. Glibin, A.A. Shevtsov // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, No. 5. – P. 662–666.
2. Певчев В.П. Моделирование нагрузки импульсного наземного источника сейсмических волн // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 11, № 5(56). – С. 706–714.
3. Хабаров С.П. Основы моделирования технических систем. Среда Simintech / С.П. Хабаров, М.Л. Шилкина. – СПб.: Лань, 2019. – 120 с.
4. Ивашин В.В. Построение электрических цепей-аналогов механических систем с преобразовательными элементами / В.В. Ивашин, И.А. Милорадов // Изв. высш. учеб. завед. Электромеханика. – 1983. – № 7. – С. 108–111.

Глибин Евгений Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. промышленной электроники (ПЭ) Тольяттинского гос. ун-та (ТГУ)
Эл. почта: zhenya118@gmail.com

Прядилов Алексей Вадимович

Канд. техн. наук, доцент каф. ПЭ ТГУ
Эл. почта: limitov@yandex.ru

Денисова Елизавета Дмитриевна

Студентка каф. ПЭ ТГУ
Эл. почта: elz.denisova2004@mail.ru

Буйлов Лев Игоревич

Магистрант каф. ПЭ ТГУ
Эл. почта: levassbulovss@gmail.com

А.К. Гордилов, Е.С. Шандаров

Асинхронная модель управления человекоподобным роботом

Рассматривается разработка программного обеспечения для управления человекоподобным роботом в составе интерактивных приложений. Предложено использовать различные подходы по обработке поступающих команд на выполнение сложных движений роботом с большим числом степеней свободы. Показано, что выбор варианта управления зависит от конкретного сценария использования робота.

Ключевые слова: робототехника, человекоподобный робот, робот-аниматор, асинхронная модель управления.

Человекоподобные роботы представляют собой весьма интересный объект для изучения как в прикладном, так и в теоретическом смысле [1]. Одной из важнейших задач в этой области является решение задач управления движениями человекоподобных роботов [1–3].

Одним из проектов лаборатории робототехники и ИИ ТУСУР (ЛРИИ) является робот-аниматор [4], где используется платформа человекоподобного робота для привлечения внимания к выставочным стендам. Платформу робота-аниматора возможно использовать для увеличения интерактивной составляющей таких разработок, как образовательные платформы, социальные роботы и пр. [5].

В данной работе рассматриваются способы управления движениями человекоподобного робота.

Основная часть

Робот-аниматор построен на платформе Robotis Engineering Kit 1, его внешний вид приведен на рис. 1.

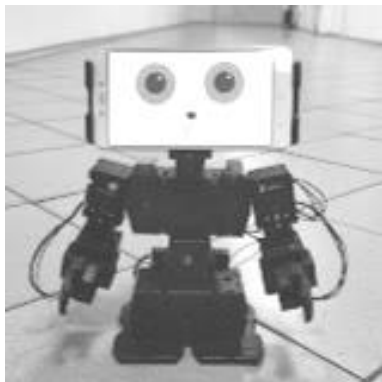


Рис. 1. Внешний вид робота-аниматора

Робот-аниматор управляется контроллером CM-550 (рис. 2). Микроконтроллер основан на процессоре ARM Cortex M4 с разрядностью 32 бита. Поддерживает подключение по USB, UART и Bluetooth. Способен связываться со смартфоном.



Рис. 2. Контроллер CM-550

CM-550 поддерживает программирование на языках TASK и MicroPython. Создание движений происходит в программе R+ Task.

Движение состоит как минимум из двух кадров, в каждом из них задается положение сервоприводов. Меняя время между этими двумя кадрами, изменяется скорость смещения робота из одной позиции в другую. Файлы движений представляют собой положение сервоприводов в разные фазы на временной шкале. В качестве примера приведем 2 движения: приветствие и танец. Приветствие длится 5 с и состоит из 5 фаз, в каждой указано положение сервоприводов, фаза из одной плавно перетекает в другую. Движение танец состоит из 17 фаз с общей длительностью 23 с.

Особенности выполнения движений

Для плавного перехода между движениями каждое должно начинаться и заканчиваться базовым положением робота.

На данный момент робот работает в автономном режиме, т.е. циклично воспроизводит анимации из набора без управления человеком. Тем не менее представляет интерес ситуация, когда робот, получив команду из интерактивного приложения, останавливает текущую анимацию и выполняет специфическое движение, затем возвращается к обычному режиму. Также нам представляется важным изучить возможность быстрого переключения между анимациями в случае получения внешней команды.

Поскольку, как было показано выше, невозможно мгновенно запустить на выполнение движение робота, если в данный момент происходит выполнение другого движения, необходимо разработать модель управления движениями. После анализа особенностей робота-аниматора мы предложили 3 различных сценария обработки команд, поступающих роботу.

- Игнорирование команд пользователя, если роботом уже выполняется движение. В этом случае возможно подать звуковой сигнал о занятости робота.
- Остановка выполнения текущей анимации, запуск движения, соответствующего принятой команде.
- Прием команд для последующего выполнения после завершения текущих анимаций (очередь).

Эксперимент

Для проведения эксперимента было решено использовать пульт управления RC-100 для отправки

команд. RC-100 использует для связи с роботом соединение Bluetooth стандарта BLE. Общение с роботом происходит путем отправки сообщений в соответствии с протоколом RC-100. Протокол RC-100 предусматривает сообщения длиной 6 байт, формат которых приведен на рис. 3. Преамбула сообщения – это два байта #FF и #55. Собственно командой является число от 0 до 65 536, которое разбивается на младший и старший байты и отправляется в обычном и в инверсном виде на CM-550.

FF	55	Data_L	~Data_L	Data_H	~Data_H
----	----	--------	---------	--------	---------

Рис. 3. Формат сообщения протокола RC-100

Были разработаны 3 варианта программы на MicroPython с разными механизмами обратной связи: подача звукового сигнала, добавление движений в очередь на исполнение и прерывание движения.

Игнорирование команд: пользователь отправляет команду, робот её получает, проверяет, выполняется ли уже в данный момент движение, и, если да, подает звуковой сигнал о занятости. Данная модель является самой простой, но она уже добивается цели, давая пользователю статус работы робота, несмотря на то, что команды пользователя игнорируются.

Добавление движений в очередь. При получении команд пользователя, а также при активном движении их значения добавляются в буфер, которые в дальнейшем выполняются друг за другом. В качестве буфера используется массив с числовыми кодами команд. После выполнения команды она удаляется из очереди. Так мы можем добиться варианта, где робот не игнорирует посылаемые команды, а выполняет их со временем. В данном способе есть недостатки, которые надо учитывать. Например, в массив можно добавить большое количество команд, что может привести к тому, что придётся долго ждать активации движения. Рекомендуется либо ограничить максимальное число элементов в массиве, либо добавить проверку на наличие движения в нём и игнорировать при её наличии. Также полезно будет совмещать данную модель с предыдущей, чтобы пользователь понимал, что происходит.

Остановка движения и выполнение следующего. При получении команд от пульта управления

робот полностью останавливает движение, возвращается в базовое положение и начинает выполнять новое движение. Таким образом, можно добиться максимальной реакции робота на команды пользователя.

Заключение

Для решения задачи были предложены три варианта для управления роботом, основанных на асинхронной модели. Выбор варианта обработки внешних команд роботу зависит от конкретного сценария использования человекоподобного робота.

Литература

1. Станкевич Л.А. Гуманоидные роботы / Л.А. Станкевич, А.В. Бахшиев, А.В. Лопота. – СПб.: Медиапир, 2020. – 310 с.
2. Humanoid Robot Soccer Player for RoboCup Junior League Competitions / E. Shandarov, I. Shabalin, I. Prokazina et al. // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12336 LNAI. – P. 283–294. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_28.
3. Платформа образовательного человекоподобного робота для игры в футбол / И.Д. Шабалин, В.В. Желонкин, И.Ю. Проказина и др. // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1 (32). – С. 236–244.
4. Разработка робота-аниматора на платформе Robotis Engineer / А.К. Городилов // Научная сессия ТУСУР: матер. докладов междунар. науч.-техн. конференции: в 4 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Ч. 1. – С. 296–299.
5. Использование социального робота для увеличения интерактивной составляющей электронных образовательных ресурсов / А.А. Согомонянц, Е.С. Полинцев, И.Д. Шабалин, Е.С. Шандаров // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. – 2020. – № 1-2. – С. 51–53.

Городилов Александр Константинович

Студент каф. электронных приборов (ЭП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: simonpacket@yandex.ru

Шандаров Евгений Станиславович

Ст. преп. каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: shandarov@mail.ru

А.А. Радкевич, С.А. Павлюковец

Адаптивный алгоритм управления для минимизации вибраций при управлении мобильной платформой с колёсами механум

Рассмотрен вопрос разработки системы управления движением мобильной платформы на всенаправленных колёсах, в которой значения вибраций механум-колёс корректируются при помощи нейросетевого контроллера. Представлена имитационная модель системы адаптивного управления и описаны шаги механизма адаптации платформы к вибрациям механум-колёс.

Ключевые слова: механум-колесо, всенаправленное колесо, мобильная платформа, адаптивное управление, вибрации, ПИД-регулятор, нейросетевой контроллер.

Всенаправленные колёса типа механум обеспечивают голономное движение мобильных платформ, однако непостоянство контакта свободно вращающихся роликов с поверхностью вызывает периодические вибрации в вертикальной оси Z трёхмерной пространственной системы координат XYZ , которые снижают точность управления мобильным роботом, вызывая отклонения курса следования платформы от определённой траектории. Кроме того, колебания мобильного робота, вызванные вращением механум-колёс, негативно сказываются на показаниях бортовых датчиков, внося ошибки и помехи в регистрацию координат, а также приводят к колебаниям и деформации подвески робота, радиальным нагрузкам и вибрациям электродвигателей колёс.

Наличие данной проблемы обращало внимание исследователей в области робототехники, которые в качестве её решения предлагали алгоритмические подходы к минимизации вибраций за счёт модификации системы управления роботом, а также конструкционные подходы к изменению геометрии механум-колёс. Исследование, представленное в статье [1], рассматривало оптимизацию топологии механум-колеса и изменение свойств материалов роликов, в результате чего амплитуда вибраций снизилась примерно на 30%.

Алгоритмические подходы к снижению вибраций предполагают адаптацию параметров управления в реальном времени с учётом изменяющихся условий эксплуатации и внешних возмущений. В рамках такого подхода с использованием модифицированного алгоритма оптимизации подражением пчелиной колонии в работе [2] была оптимизирована конструкция колёс механум для мобильного кресла-коляски, показавшая снижение вибраций колёс на 3,297 %.

Один из вариантов алгоритмического подхода предполагает применение адаптивных контроллеров для роботов на механум-колёсах, направленных на подавление немоделируемой динамики и внешних возмущений, вызванных реакцией поверхности. В рамках исследования [3] была продемонстрирована повышенная устойчивость робота к неопределёностям среды и внешним факторам, улучшая точность слежения и подавление возмущений при различных нагрузках и покрытиях. При этом большинство по-

добных исследований сосредоточено на задачах оптимизации контроля траектории робота, а не на минимизации вибраций, что оставляет открытой проблему целенаправленного контроля и минимизации вибраций механум-колёс.

Экспериментальное исследование [4], в котором рассматривалось управление мобильным роботом на механум-колёсах на основе низкоуровневого закона управления с введением рампообразной характеристики в опорный сигнал для снижения ошибки проскальзывания колёс, показало снижение пробуксовки и резких ускорений колёс, что косвенно уменьшает уровень вибраций при старте и торможении платформы. Однако системный подход к проектированию адаптивных контуров вибрационного контроля, включающих обратную связь от колеса, до сих пор недостаточно исследован. Это обосновывает необходимость разработки интегрированного алгоритма, ориентированного на активное подавление вибраций в мобильных платформах с колёсами механум.

В данной работе предлагается алгоритм адаптивного управления, направленный на внедрение механизма нейросетевого ПИД-регулирования с учётом сигналов акселерометра колеса, который позволит повысить плавность работы, точность позиционирования и минимизировать вибрации, вызываемые конструктивными особенностями колёс механум в мобильных платформах.

Модель адаптивного управления платформой для минимизации вибраций механум-колёс

Модифицированная модель управления мобильной платформой на механум-колёсах содержит механизм адаптации к проскальзыванию роликов колёс, основанный на измерении ускорения колеса при помощи датчика и подаче сигнала обратной связи с датчика ускорения колеса на адаптивный контроллер. Таким образом, к классической динамической модели мобильного робота добавляется модель, учитывающая и отслеживающая нелинейные колебания вибраций, вызванные проскальзыванием механум-колёс.

Имитационная модель адаптивной системы управления мобильной платформой с колёсами механум для минимизации вибраций колёс, реализо-

ванная в среде динамического моделирования SimInTech, представлена на рис. 1.

В данной имитационной модели используются два регулятора: адаптивный нейросетевой регулятор, реализующий алгоритм адаптации вибраций колеса, и классический ПИД-регулятор, формирующий управляющее воздействие динамики колеса. В подсистеме нейросетевого регулятора заложен адаптивный закон, описываемый трёхслойной искусственной нейронной сетью, на вход которой поступает текущая ошибка вибрации u_{err} и вектор предыдущих значений коэффициентов ПИД-регулятора K_P, K_I, K_D и шага дискретизации T_s : $[K_P^{PREV}, K_I^{PREV}, K_D^{PREV}, T_s]$.

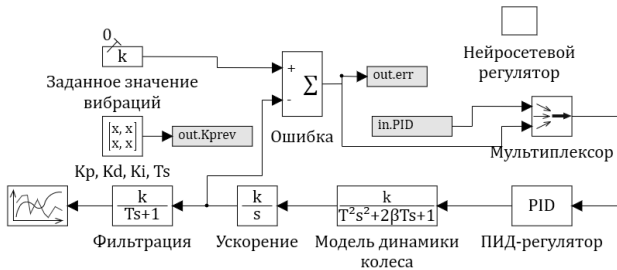


Рис. 1. Имитационная модель адаптивного алгоритма системы управления мобильной платформой для минимизации вибраций механум-колёс

Описание работы алгоритма адаптации

Блок «Заданное значение вибраций» представляет задание целевого значения вибраций y_{ref} (опорное значение вибраций равно 0).

В блоке ошибки происходит вычисление ошибки между измеренным уровнем вибрации $y_{vib}(t)$ (интегрированная скорость) и опорным значением вибрации. Блок представлен сумматором с отрицательной обратной связью от датчика вибраций, формируя тем самым полный замкнутый контур автоматической регуляции усиления (АРУ) по подавлению вибраций. На выходе сумматора вычисляется сигнал ошибки $u_{err}(t)$:

$$u_{err}(t) = u_{ref}(t) - y_{vib}(t). \quad (1)$$

Инициализация предыдущих значений коэффициентов ПИД-регулятора K_{PREV} , поступающих на вход нейросетевого контроллера, представлена вектором $[K_P^{PREV}, K_I^{PREV}, K_D^{PREV}]$, в котором записаны коэффициенты, применявшиеся на предыдущем шаге адаптации. Нейросетевой контроллер производит чтение данного вектора, сравнение его с текущей ошибкой u_{err} , корректировку коэффициентов и производит расчёт нового вектора коэффициентов ПИД-регулятора $[K_P, K_I, K_D]$ на следующем этапе обработки сигнала.

Непосредственно векторный блок $[K_P, K_D, K_I, T_s]$ содержит четырёхкомпонентный вектор: первые три элемента – предыдущие значения коэффициентов регулятора K_P, K_I, K_D , с которыми работала система на прошлом такте; четвёртый элемент T_s обычно служит либо для задания дискретного шага времени в ПИД-регуляторе, либо в качестве коэффициента фильтра (N) при реализации цифрового дифференциатора. Вектор T_s напрямую не влияет на

динамику робота, он входит в блок нейросетевого контроллера, чтобы давать базовые (исходные) коэффициенты адаптивному закону управления.

Подсистема нейросетевого регулятора рассчитывает новые значения ПИД-регулятора $[K_P, K_I, K_D]$ на основе текущей ошибки вибрации u_{err} и вектора предыдущих значений коэффициентов ПИД-регулятора K_{PREV} . В нейросетевом регуляторе реализуется алгоритм адаптации системы к вибрациям, генерируются актуальные коэффициенты на основе входной ошибки и предыдущих значений в соответствии с функцией

$$[K_P, K_I, K_D] = f(u_{err}, [K_P^{PREV}, K_I^{PREV}, K_D^{PREV}]). \quad (2)$$

При этом нейросетевой контроллер использует сигнал u_{err} лишь как вход для расчёта новых коэффициентов – он не выдаёт управляющий сигнал напрямую. Чтобы при такой связке не возникла алгебраическая петля, достаточно внутри подсистемы нейросетевого контроллера использовать задержку или память (значения K_{PREV} берутся из прошлого шага) либо задать разный такт для адаптивного закона и основного ПИД-регулирования. Таким образом, получаются два параллельных потока: один для адаптации коэффициентов, другой для собственно регуляции коэффициентов. Обновлённый вектор коэффициентов $[K_P, K_I, K_D]$ с выхода нейросетевого регулятора поступает на вход шины мультимплексора.

Блок мультимплексора представляет шину данных, объединяющую два входных сигнала: сигнал векторов значений обновлённых коэффициентов ПИД-регулятора, поступающих от подсистемы нейросетевого контроллера $[K_P, K_I, K_D]$ на следующий момент времени, и сигнал текущей ошибки u_{err} . В результате мультимплексирования блоком формируется управляющее воздействие u_{out}^{MUX} , которое подаётся на вход дискретного ПИД-регулятора.

Унифицированный блок ПИД-регулятора обрабатывает объединённый вектор входных коэффициентов ПИД-регулятора и текущей ошибки вибрации $u_{err} [K_P, K_I, K_D, u_{err}]$ с выхода нейросетевого регулятора и выдаёт управляющее воздействие сигнала u_{out} , определяющее динамику движения платформы. Формирование управляющего воздействия осуществляется по закону

$$u_{out}(t) = K_P \cdot u_{err} + K_I \int u_{err} dt + K_D \frac{du_{err}}{dt}. \quad (3)$$

Необходимость использования в системе управления дискретного ПИД-регулятора объясняется тем, что нейросеть не смогла бы напрямую выдать корректный управляющий сигнал, для этого необходим классический регулятор для гарантии сходимости и предсказуемости.

Модель динамики колеса механум имитирует его динамическую модель с учётом влияния внешних возмущений на систему. Она представлена колебательным звеном с постоянной времени T , равной 0,2 с.

В блоке ускорения имитируется акселерометр (гироскопический датчик) для измерения вибраций

колеса меканум. Блок измеряет угловое ускорение колеса (интеграция сигнала угловой скорости колеса) и выдаёт на выходе сигнал измеренной вибрации $y_{\text{vib}}(t)$. После чего значение измеренной вибрации проходит через фильтрацию апериодическим звеном и поступает на отрицательный вход сумматора, замыкая контур адаптивного управления по текущим значениям уровня вибраций. Визуализация результатов значений вибраций реализована блоком «Временной график».

Заключение

Таким образом, полный цикл алгоритма адаптивного управления движением меканум-платформой для минимизации вибраций меканум-колёс включает шаги:

1. Задание целевого значения вибраций равным 0.
2. Измерение фактического уровня вибраций при помощи акселерометра.
3. Вычисление ошибки рассогласования текущее и заданного значения вибраций.
4. Адаптация коэффициентов ПИД-регулятора при помощи нейросетевого контроллера.
5. Регулирование коэффициентов ПИД-регулятора дискретным ПИД-регулятором.
6. Формирование управляющего воздействия на основе динамической модели колеса.
7. Новый замер значений вибраций, фильтрация и визуализация результатов.

Предложенный адаптивный алгоритм и модель управления позволяют в реальном времени корректировать коэффициенты ПИД-регулятора на основе данных акселерометров, что обеспечивает эффективное подавление вибраций мобильной платформы с колёсами меканум и повышает точность и плавность её движения. Перспективы исследования заключаются во внедрении методов машинного обучения для прогнозной настройки контроллера, адаптации алгоритма к изменяющимся нагрузкам и характеристикам покрытия. Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на расширение

функциональности контроллера для обработки многоканальных вибрационных сигналов, применение в многосвязных и кооперативных роботизированных системах, что откроет новые возможности для повышения надёжности и безопасности эксплуатации всенаправленных платформ.

Литература

1. Doroliat A.P. Optimization of mecanum wheels for mitigation of AGV vibration / A.P. Doroliat, M.H. Ing, G.Li. Chih-Hung // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121, № 1. – P. 633–645.
2. Yadav P.S. Modeling and performance evaluation of mecanum wheel platform with reduced vibration and a robust path planning / P.S. Yadav, J.C. Mohanta, V. Agrawal, M.F. Ahmed // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46, № 5. – P. 292.
3. Hendzel Z., Kołodziej M. Adaptive Neural Network Control for Mobile Robot with Mecanum Wheels: Experimental Validation // Conference on Automation. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 213–222.
4. Hernandez J.C.O. Experimental control approach of a mecanum-wheeled mobile robot for slippage error and energy consumption reduction on different surfaces / J.C.O. Hernandez, D.I.R. Almeida // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2024. – Vol. 38, № 11. – P. 6309–6318.

Радкевич Артём Андреевич

Мл. науч. сотр. лаб. робототехнических систем
ГНУ «Объединённый институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»
Эл. почта: a_radkevich@newman.bas-net.by

Павлюковец Сергей Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент каф. электроприводов
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов
Белорусского национального технического университета
Эл. почта: sap@bntu.by

Д.Ф. Плещев, А.В. Федотов, Ю.О. Лобода, М.Е. Антипин

Создание нейроинтерфейса управления роботом-помощником для людей с ограниченными возможностями

Нейроинтерфейс будет позволять управлять робототехническими устройствами путем обработки и преобразования сигналов электроэнцефалограммы (далее – ЭЭГ), помогающими людям с ограниченными возможностями. Для того чтобы сформировать команду, нужно считывать и правильно интерпретировать ЭЭГ-сигнал.

Ключевые слова: нейроинтерфейс, ЭЭГ-сигнал, когнитивные сигналы, робототехника, нейроуправление, система 10-20, преобразование Фурье.

В современном мире технологии робототехники стремительно развиваются, оставаясь одним из самых перспективных технических направлений. Роботы постепенно внедряются во все сферы деятельности – от крупных предприятий и медицины до обычной жизни человека.

Основная проблема заключается в отсутствии доступных и эффективных систем управления, которые позволили бы людям с тяжелыми формами ограниченных возможностей самостоятельно, без постоянного привлечения стороннего помощника или медицинского персонала, выполнять рутинные бытовые действия. Во многих ситуациях требуется реализация точного удаленного управления роботом с обеспечением достаточной степени свободы и минимального задействования моторики у пользователя. Также сам нейроинтерфейс должен обеспечивать высокую точность распознавания намерений пользователя при минимальном времени отклика системы и комфортном, простом в использовании, чтобы не создавать дополнительные барьеры для конечного пользователя.

Существует множество способов управления роботом, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, различную область применения и назначение. Перспективным и инновационным направлением является управление роботом с помощью биоданных, в частности, когнитивных сигналов.

Для снятия данных о когнитивных сигналах человека используется высокотехнологичное оборудование – нейроинтерфейс. Современные нейроинтерфейсы позволяют получить данные когнитивной активности человека в реальном времени, что позволяет реализовать нейроуправление роботом. Нейроуправление как способ управления мехатронными устройствами является удобным и потенциально точным способом. Он позволяет реализовать удаленное управление роботом без использования каких-либо дополнительных элементов управления.

Нейроинтерфейс – устройство, позволяющее человеческому мозгу взаимодействовать с программным обеспечением, таким как микроконтроллер, компьютер или робототехническая установка [1].

Эти устройства считывают данные о когнитивной активности человека. Эти данные отправляются на внешний носитель для дальнейшей обработки.

Существует три вида нейроинтерфейсов [2]:

1. *Неинвазивные* нейроинтерфейсы – устройства с электрическими датчиками, которые не требуют прямого контакта с мозгом и крепятся на кожный покров головы носителя. Их недостатком является неточность данных, а достоинством – безопасность использования, т.к. прямой контакт с мозгом отсутствует.

2. *Полуинвазивные и инвазивные.* Инвазивный нейроинтерфейс – тип нейрокомпьютерного интерфейса, при котором электроды расположены на открытой поверхности мозга. Недостаток такого нейроинтерфейса – сложность внедрения в мозг, однако в этом случае данные, полученные с нейроинтерфейса, имеют максимальную точность.

Основное различие между инвазивным и неинвазивным нейроинтерфейсом заключается в том, что данные, полученные с неинвазивного нейроинтерфейса, содержат очень много сторонних шумов, из-за чего точность сигнала ухудшается.

Для точного снятия ЭЭГ-сигналов используется «система 10-20», которая представляет собой способ расположения электродов на коже головы пациента. Система несет такое название, поскольку каждый следующий электрод отступает от предыдущего на 10 или 20% от индивидуального размера головы [3].

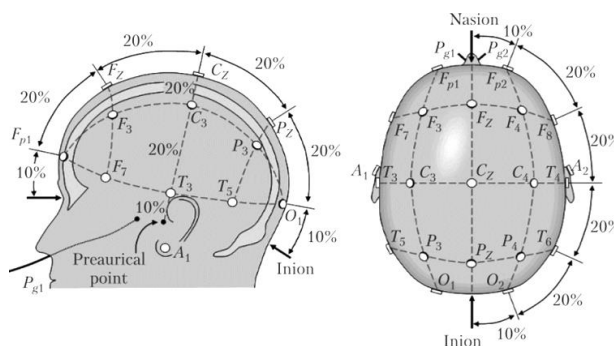


Рис. 1. Схема расположения электродов по «системе 10-20»

На рис. 1 представлена схема расположения электродов с наименованиями зон:

Сигнал считывается с каждой из 20 зон и записывается в базу данных: Fp1, Fp2 – переднелобные; F3, F4, Fz – лобные; C3, C4, Cz – центральные; P3, P4, Pz – теменные; F7, F8 – передневисочные; T3, T4 – средневисочные; T5, T6 – задневисочные; O1, O2 – затылочные; A1, A2 – ушные.

Нечетные номера указывают на левое полушарие, четные – на правое.

Существует множество ритмов ЭЭГ, однако зачастую выделяется 5 основных: альфа, бета, тета, дельта, гамма [4]. Это ритмы, используемые в медицине для диагностики неврологических и психиатрических заболеваний. Эти же ритмы возможно исследовать с целью выявления паттернов для управления роботом. Каждый ритм выделяется на определенной частоте и в определенной зоне, в соответствии с «системой 10-20». В таблице представлены 5 наиболее часто выделяемых ритмов, с обозначением их частот и зон по «системе 10-20».

Частота ритмов ЭЭГ

Название ритма (сигнала)	Частота, Гц	Зона по «системе 10-20»
Альфа	8–12	O1, O2, P3, P4
Бета	13–30	F3, F4, C3, C4
Тета	4–7	T3, T4
Дельта	0,5–4	Fp1, Fp2
Гамма	30–100	Fz, Cz, Pz

Различные изменения состояния человека влияют на амплитуду всех ритмов по-разному. Каждый из ритмов возможно фиксировать в любой зоне из представленных в «системе 10-20», однако в соответствии с таблицей следует выделять каждый ритм из определенной зоны. Такой подход позволит получить наиболее чистый сигнал с меньшим количеством шумов.

1. *Ритм альфа*. Амплитуда сигнала увеличивается при расслаблении человека, а также в моменты, когда человек сконцентрировал свое внимание на чем-либо. Данный ритм наиболее выражен в зонах «O1», «O2», «P3» и «P4».

2. *Ритм бета*. Амплитуда сигнала увеличивается при легкой когнитивной нагрузке либо в состоянии повышенной концентрации. Данный ритм наиболее выражен в зонах «F3», «F4», «C3» и «C4».

3. *Ритм тета*. Ритм отвечает за легкое расслабление. Амплитуда сигнала немного увеличивается при бездействии либо при попытке сдержать эмоции. Данный ритм наиболее выражен в зонах «T3» и «T4».

4. *Ритм дельта*. Ритм отвечает за подсознательные процессы человека. Используется в основном для исследования сна человека. Данный ритм наиболее выражен в зонах «Fp1» и «Fp2».

5. *Ритм гамма*. Амплитуда сигнала будет сильно изменяться в моменты, когда человек выполняет какие-либо сложные задачи либо усиленно концентрируется на конкретном действии. Лучше всего фиксируется в центральных зонах Fz, Cz, Pz.

Перед тем как описывать нейроуправление, нужно упомянуть о том, что перед началом работы необходимо выделить различные паттерны ЭЭГ-сигналов для использования в дальнейшем. В экспериментах, проведенных в рамках данной работы, будет выделен 1 паттерн.

Между зарождением сигнала в мозге человека и выполнением роботом действия необходимо провести следующий алгоритм действий:

1. *Снятие и запись данных ЭЭГ-сигналов*. На этом этапе данные с электрода поступают на компьютер.

2. *Обработка данных ЭЭГ-сигналов*. Из полученного сырого сигнала необходимо выделить определенные ритмы, описанные ранее. Для этого необходимо следующее:

3. *Проведение прямого преобразования Фурье*. Прямое преобразование Фурье позволяет выделить амплитудно-частотную характеристику сигнала на определенной частоте.

4. *Проведение обратного преобразования Фурье*. Для удобного анализа необходимо данные выделенной частоты вернуть на временной спектр представления.

5. *Поиск паттерна амплитуды*. При анализе данных необходимо выявить закономерности изменения сигналов при выполнении определенных действий. После этого в код программы необходимо добавить функцию, фиксирующую определенные изменения в сигнале. Программа фиксирует паттерн амплитуды ЭЭГ-сигналов. В случае если программа фиксирует определенный паттерн, он выполняет заданное ему действие.

6. *Передача команды устройству*. Передача команды осуществляется любым протоколом передачи данных, например «TCP/IP» или «bluetooth», в зависимости от модели устройства.

Как и в любой инновационной области науки, в области нейроуправления существует множество нерешенных проблем [5].

1. *Юридическое регулирование*. Любой нейроинтерфейс считается медицинским устройством. Это значит, что перед выходом на рынок нейроинтерфейсы должны пройти большое количество проверок и тестов. Причем основная проблема в том, что условия выдачи лицензий не представляют даже сами регуляторы, из-за чего лицензирование нового нейроинтерфейса становится большой проблемой.

2. *Экономика*. Рынок нейроинтерфейсов в данный момент небольшой, а все устройства очень дорогие. Также почти отсутствует спрос на подобные устройства. Из-за этого массовое использование и тем самым производство не представляется возможным.

3. *Проблема передачи данных*. Современные протоколы передачи данных не позволяют передавать данные достаточно быстро, далеко и точно. Например, протокол передачи данных Bluetooth 5.0 передает данные на расстоянии не более 150 м, из-за чего теряется возможность управлять, например, дронами с помощью большинства нейроинтерфейсов.

4. *Этика*. Из-за правил этики в данный момент очень трудно проводить испытания инвазивных нейроинтерфейсов, поскольку для этого необходимо подтвердить исключительную безопасность продукта.

5. *Информационная и личностная безопасность.* Нейроинтерфейсы должны соответствовать стандартам информационной безопасности. В обратном случае конфиденциальная информация может стать публичной, а если нейроинтерфейс имеет функцию отправки сигналов, то злоумышленник, взломавший нейроинтерфейс, сможет управлять действиями человека, что может повлечь за собой страшные последствия.

6. *Влияние на здоровье.* В данный момент неизвестно, как инвазивные нейроинтерфейсы влияют на здоровье центральной нервной системы человека, из-за чего требуется проводить множество исследований, что еще сильнее замедляет развитие. Пока противопоказаний не обнаружено.

7. *Отсутствие доступных обработчиков данных.* На данный момент для большинства нейроинтерфейсов не существует доступного обработчика данных, поскольку код большинства нейроинтерфейсов закрыт, а нахождение технической документации зачастую становится сложной задачей.

Все эти проблемы замедляют развитие возможностей управления мехатронными устройствами с помощью нейроинтерфейсов, однако не мешают проводить начальные исследования в этой области с целью выявления закономерностей.

Следует отметить, что на начальном этапе разработки будет использоваться неинвазивный нейроинтерфейс на основе ЭЭГ. Данный выбор обусловлен прежде всего требованиями безопасности, простоты использования и доступности для конечного пользователя. Несмотря на присущие неинвазивным методам более низкое соотношение сигнала/шум и ограниченную пропускную способность канала связи, их точности будет достаточно для распознавания набора базовых когнитивных команд, необходимых для управления заранее запрограммированными действиями робота-манипулятора.

Учитывая базовые требования, в данной работе была выбрана конфигурация из 8 электродов. Они будут размещены по Международной «системе 10-20» в позициях: Fz, C3, Cz, C4, Pz, O1, O2, A1. Данный выбор обеспечит надежный захват ЭЭГ-сигналов моторной активности и изменений альфаритма, необходимых для управления, при максимальном удобстве для конечного пользователя.

Выводы

Следует отметить, что предложенная конфигурация из 8 электродов ориентирована на считывание

ЭЭГ-сигналов моторного воображения и альфаритма, представляет собой оптимальный баланс между точностью и практическим применением для конечного пользователя. Обработка сигналов через анализ ритмов позволит выделять базовые когнитивные команды для управления роботом-помощником. Несмотря на недостаток, такой как низкое соотношение сигнал/шум, данный подход является путем к созданию доступных и безопасных нейроинтерфейсов.

Литература

1. Напрямую в мозг: что такое нейроинтерфейсы и как они могут изменить человека [Электронный ресурс]: Официальный сайт Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/companies/gazprombank/articles/773846/> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Классификация нейроинтерфейсов [Электронный ресурс]: CMI Brain research. – URL: <https://cmi.to/нейроинтерфейс/классификация-нейроинтерфейсов/> (дата обращения: 10.02.2025).
3. Система 10-20 [Электронный ресурс]: CMI Brain research. – URL: <https://cmi.to/ээг/система-10-20/> (дата обращения: 17.02.2025).
4. Ритмы ЭЭГ [Электронный ресурс]: CMI Brain research. – URL: <https://cmi.to/ритмы-ээг/> (дата обращения: 17.02.2025).
5. Напрямую в мозг: что такое нейроинтерфейсы и как они могут изменить человека [Электронный ресурс]: Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/companies/gazprombank/articles/773846/> (дата обращения: 20.02.2025).

Плещев Данил Федорович

Студент каф. управления инновациями (УИ)
Томского университета систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: danilpleshchv02@bk.ru

Федотов Алексей Владимирович

Мл. технико-коммерческий специалист ООО «Элком»
Эл. почта: fedotovav2003@gmail.com

Лобода Юлия Олеговна

Доцент каф. управления инновациями (УИ) ТУСУРа
Эл. почта: lyo@2i.tusur.ru

Антипин Михаил Евгеньевич

Доцент каф. УИ ТУСУРа
Эл. почта: mikhail.e.antipin@tusur.ru

И.Д. Кречетова, Ю.Н. Михайлова, Е.С. Шандаров

Модель управления человекоподобным роботом для игры в футбол

Представлена модель управления человекоподобным роботом-футболистом, основанная на применении конечных автоматов. Предложенный подход позволяет формализовать поведение робота в условиях игры, разделив его на конечный набор состояний. Программно-аппаратный комплекс реализован на базе Robotis Bioloid Premium. Разработан алгоритм управляющей программы, обеспечивающий поиск и следование за мячом, ориентацию на ворота, выполнение ударов по мячу и подъем робота после падения.

Ключевые слова: футбол роботов, RoboCup, человекоподобный робот, система управления, автоматы конечных состояний.

Футбол человекоподобных роботов является интересной задачей как с прикладной, так и с теоретической точки зрения. В мире существует несколько турниров человекоподобных роботов. Самый известный из них – это RoboCup, основанный в 1997 г. в целях интенсификации исследований в области робототехники и искусственного интеллекта путем проведения робототехнических соревнований между командами ученых и исследователей [1].

Традиционно футбол человекоподобных роботов позиционируется как наиболее сложный и дорогой вид соревнований [2]. Связано это как с относительно высокой стоимостью оборудования, так и с высокими требованиями к теоретической и практической подготовке участников. Тем не менее в 2020 г. коллективом лаборатории робототехники и ИИ ТУСУРа (ЛРИИ) была представлена разработка, открывающая доступ к футболу человекоподобных роботов для команд юниоров – школьников и студентов младших курсов [3, 4]. В качестве базовой платформы могут быть использованы относительно недорогие образовательные роботы, а программирование происходит для широко распространенных микроконтроллеров класса Arduino. Это существенно снижает порог входа, но создает сложности с разработкой системы управления роботом.

В данной работе представлен подход к разработке ПО системы управления автономным роботом-футболистом на базе концепции конечных автоматов (FSM).

В качестве базовой платформы для робота-футболиста в данной работе была выбрана платформа Robotis Bioloid Premium, отвечающая всем требованиям лиги. Данная платформа обладает 18 степенями свободы, использует приводы серии Dynamixel AX-12A. Программирование робота производится в среде ПО R+Task, а разработка движений – в R+Motion. Программирование ведется на собственном языке компании Robotis.

Для решения задач навигации, поиска мяча, ворот и иных объектов на поле было решено использовать систему технического зрения TrackingCam. В этом случае первичная обработка изображений производится встроенным в СТЗ микрокомпьютером, который может быть предварительно обучен к рас-

познаванию объектов по цвету, форме, площади [5]. Для интеграции камеры СТЗ в конструкцию робота были применены два дополнительных привода, обеспечивающих позиционирование камеры по двум координатам (**по горизонтальной и вертикальной осям относительно корпуса робота**), как это показано на рис. 1.

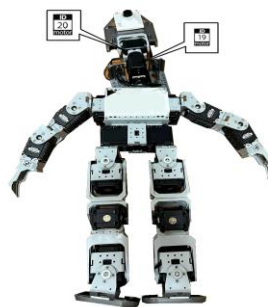


Рис. 1. Внешний вид робота-футболиста

Архитектура разработанного программно-аппаратного комплекса (далее – ПАК) представлена на рис. 2.



Рис. 2. Архитектура ПАК робот-футболист

Как видно из рис. 2, ПАК включает в себя следующие ключевые части: блок технического зрения, блок передвижения, блок навигации и блок управления. Главная задача блока управления: сбор сведений с других блоков и формирование управляющего воздействия на приводы робота для осуществления движения, позиционирования и пр.

В роботе-футболисте изначально установлен относительно слабый контроллер, поэтому модуль технического зрения с его возможностью опреде-

ния координат и площади объекта, обрабатывает получаемое изображение и передает на управляющее устройство непосредственно площадь объекта с выбранным в настройках цветом.

Для программирования блока управления, обеспечивающего автономное поведение робота-футболиста, было решено использовать концепцию конечных автоматов (Finite State Machine – FSM). Это модель управления, в которой поведение системы описывается набором конечного числа состояний (state) и правил переходов между ними, а переключение в другое состояние осуществляется только за счет выполнения необходимых условий. Был определен набор возможных состояний, в которых может находиться робот в процессе игры. Эти состояния выделены в таблицу.

Конечные состояния автомата человекоподобного робота-футболиста

Состояние	Описание действий робота	Условие перехода	Следующее состояние
Ожидание	Робот стоит на месте, инициализирует сенсоры и ждет старта	Начало игры	Поиск мяча
Поиск мяча	Робот поворачивает камеру по окружности в поисках мяча	Мяч найден	Следование за мячом
		Тайм-аут (мяч не найден)	Поиск мяча
Следование за мячом	Робот движется к мячу, корректируя движения в зависимости от данных с СТЗ	Мяч потерян из поля зрения	Поиск мяча
		Мяч рядом с роботом (расстояние до мяча меньше порога)	Ориентация на ворота
Ориентация на ворота	Робот определяет положение ворот и занимает оптимальную позицию для удара	Ворота найдены, положение корректно	Удар по мячу
		Ворота не определены	Поиск мяча
Удар по мячу	Выполнение удара по мячу, выбор ноги зависит от расположения мяча в кадре СТЗ	Удар завершен	Возврат
Возврат	Возвращение в игровую позицию	Успешно восстановился	Поиск мяча
Падение	Определение положения, в котором упал, и в зависимости от этого подъем	Поднялся	Поиск мяча

В таблице приведены набор возможных состояний робота-футболиста и условие перехода к следующему состоянию.

Программа блока управления представляет собой бесконечный цикл. В начале цикла происходит проверка условий. Первым проверяется условие «Робот упал?», затем «Мяч в кадре?», затем остальные условия в порядке приоритета. На основании результатов проверки условий определяется новое

состояние робота. Если новое состояние не соответствует текущему, происходит смена текущего состояния на новое. Затем управление внутри цикла передается подпрограмме, ответственной за обработку конкретного состояния. Важно отметить, что поскольку мы имеем дело с человекоподобным роботом, управление им должно осуществляться асинхронным образом.

Рассмотрим состояние «Падение». Проверка условия «Робот упал?» производится на основании анализа информации, полученной с датчика IMU и СТЗ.

Алгоритм блока управления переходит в состояние «Робот упал» и передает управление подпрограмме «Подъем робота». Подпрограмма «Подъем робота» определяет положения робота (на спине или груди), чтобы выбрать подходящий набор движений для его подъема.

Камера СТЗ используется для детектирования падения робота следующим образом: производится проверка выполнения условий: мяч был потерян из поля зрения и численное значение площади цветного пятна в поле зрения робота превышает заданный предел. В результате экспериментов было определено, что предельное значение площади черного объекта в поле зрения камеры составляет 30 000. То есть если значение будет превышать заданное, то, соответственно, робот находится в положении на груди, и наоборот, при меньшем значении футболист будет считать, что он лежит на спине. Фрагмент кода с проверкой условий и вызовом соответствующей подпрограммы приведен на рис. 3.

```
// Подъем
FUNCTION StandUp
{
    CALL Stand
    CALL KakUpal
    IF ( BlobArea >= 30000 )
    {
        CALL StandFromChest
    }
    ELSE
    {
        CALL StandFromBack
    }
}
```

Рис. 3. Фрагмент кода подъема при падении

Следующим состоянием робота является «Поиск мяча». Поиск мяча производится путем поворота робота на месте до момента появления мяча в кадре.

После наступления условия «Мяч найден», робот переходит в состояние «Следование за мячом». В логике последнего есть важный нюанс – для того чтобы робот шел прямо на мяч и затем мог совершить удар по мячу, в прямоугольной области поля зрения робота мяч должен быть отцентрирован. Это подводит нас к вычислению угла поворота модуля технического зрения робота относительно расположения мяча в поле его зрения. Исчисления углов

поворота СТЗ по горизонтали и вертикали производится по формулам (1) и (2) соответственно

$$\theta = \left(\frac{x - W/Z}{W/Z} \right) \cdot \frac{\alpha_x}{Z}, \quad (1)$$

где θ – угол для поворота по горизонтали, x – горизонтальная координата объекта в пикселях, W – ширина изображения в пикселях, α_x – горизонтальный угол обзора камеры в градусах.

$$\varphi = \left(\frac{y - H/Z}{H/Z} \right) \cdot \frac{\alpha_y}{Z}, \quad (2)$$

где φ – угол для поворота по вертикали, y – вертикальная координата объекта в пикселях, H – длина изображения в пикселях, α_y – вертикальный угол обзора камеры в градусах.

Переход к состоянию «Удар по мячу» производится после выполнения условия «Мяч рядом с роботом». Это условие проверяется путем оценки угла поворота камеры по вертикали, при этом мяч должен находиться как можно ближе к центру кадра. После успешного центрирования мяча в области поля зрения робот корректирует положение своего туловища, а точнее, всех сервоприводов относительно уже установленного и определенного положения модуля технического зрения, таким образом, чтобы занять стандартное положение стоя (стойка «прямо»). Когда процесс центрирования мяча считается успешно завершенным, робот совершает свой удар по мячу. Фрагмент кода выполнения удара по мячу приведен на рис. 4. Выбор подпрограммы для удара зависит от того, к какой ноге робота мяч находится ближе.

```
// Правый пинк
FUNCTION RightKick
{
  WAIT WHILE ( Motion Status == TRUE (1) )
  Motion Index Number = 10
  CALL Fall
  WAIT WHILE ( Motion Status == TRUE (1) )
}

// Левый пинк
FUNCTION LeftKick
{
  WAIT WHILE ( Motion Status == TRUE (1) )
  Motion Index Number = 9
  CALL Fall
  WAIT WHILE ( Motion Status == TRUE (1) )
}
```

Рис. 4. Функция правого и левого пинка

Объединив все реализованные функции для каждой ситуации на поле, будет получен полный набор состояний конечного автомата робота-футболиста, начиная от инициализации сенсоров и поиска мяча и заканчивая выполнением удара и возвращением в стандартное положение после падения.

Заключение

В результате выполненной работы применение FSM в связке с модулем технического зрения стало эффективным решением для разработки алгоритма действий человекоподобного робота-футболиста. Использование состояний конечных автоматов позволило структурировать поведение робота, упростить отладку отдельных состояний, а также обеспечить предсказуемость реакций в различных игровых ситуациях. Развитием работы станет разработка модели управления для кооперации нескольких роботов на поле, формирование их командной тактики и внедрение мультиагентных систем. Это позволит повысить уровень интеллектуальной автономности роботов.

Литература

1. Ронжин А.Л. Международные соревнования роботов по футболу RoboCup и перспективы участия в них российских команд / А.Л. Ронжин, Л.А. Станкевич, Е.С. Шандаров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 24–29.
2. Команда роботов-футболистов лиги Robocup humanoid kidsize / С.И. Гомилко, Д.В. Жулаева, Р.В. Мещеряков и др. // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 3 (8). – С. 11–15.
3. Humanoid Robot Soccer Player for RoboCup Junior League Competitions / E. Shandarov, I. Shabalin, I. Prokazina et al. // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12336 LNAI. – P. 283–294. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_28.
4. Платформа образовательного человекоподобного робота для игры в футбол / И.Д. Шабалин, В.В. Желонкин, И.Ю. Проказина и др. // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1(32). – С. 236–244.
5. Михайлова Ю.Н. Использование камеры технического зрения TrackingCam для решения задач соревнований по футболу человекоподобных роботов // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2025»: в 4 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Ч. 1. – С. 306–309.

Кречетова Илона Денисовна

Студентка каф. ЭП ТУСУРа

Эл. почта: krechetovailona@gmail.com

Михайлова Юлия Николаевна

Студентка каф. электронных приборов (ЭП)

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Эл. почта: saltedcucumberswithdill@gmail.com

Шандаров Евгений Станиславович

Ст. преп. каф. ЭП ТУСУРа

Эл. почта: evgenyshandarov@gmail.com

А.Н. Белозерова, А.В. Крюков

Пневматическая система подачи двухкомпонентного состава для роботизированных установок

Аннот

Ключевые слова:

На сегодняшний день существует задача дешевого производства элементов конструкций летательных аппаратов общего назначения. В частности, к ним можно отнести проект БПЛА «Сарма-2» (рис. 1) [1, 2]. Данный комплекс самолетного типа предназначен для выполнения различных задач: сельскохозяйственные работы, аэрологистика, долговременный мониторинг. Обеспечение доступности данного аппарата планируется за счет широкого использования стандартного алюминиевого проката, а также листовых алюминиевых сплавов, пластика и клеевых составов.



Рис. 1. БПЛА «Сарма-2»

Для масштабирования и ускорения производства, повышения качества, а также улучшения условий труда требуется автоматизация процессов. Например, это относится к нанесению клеевого состава для крепления элементов обшивки аэродинамических поверхностей, которые монтируются при помощи клеевого состава COSMOFEN PU-200.280 [1, 4]. На разных участках клей должен наноситься определенным образом (рис. 2).

Проблемы, связанные со скоростью и равномерностью его нанесения, предлагается решать за счет использования роботизированных манипуляторов, представляющих комплекс из роборуки и пневматической системы подачи клеевого состава (далее – насадка пневмоподачи).

В рамках данной работы наша задача заключается в разработке и изготовлении системы подачи клеевого состава. Одна из основных проблем связана с тем, что клеевой состав двухкомпонентный и

его нужно равномерно и одновременно подавать в смеситель. Существующие на рынке решения не удовлетворяют нас по техническим и финансовым соображениям, поэтому было принято решение о создании собственного устройства.

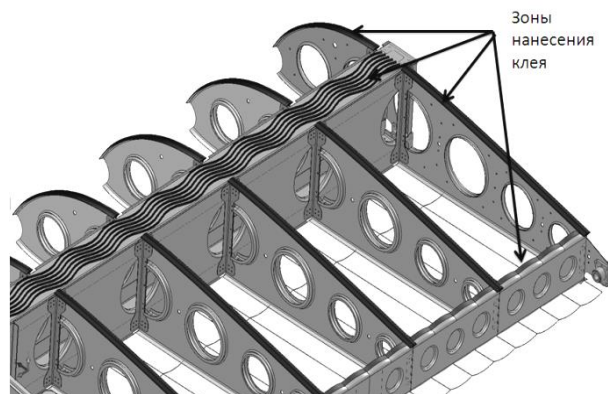


Рис. 2. Схема нанесения клея на секцию крыла

На рынке существуют аналоги подобных устройств для ручного нанесения, например, пневматический пистолет для нанесения SUBAO AB150 (рис. 3).



Рис. 3. Пневматический пистолет

На основании технических требований к пневматической системе двухкомпонентного состава для роботизированных установок и конструкции прототипа было составлено техническое задание на разработку насадка пневмоподачи.

Преимущество разрабатываемого устройства заключается в экологической и экономической эффективности. Установка, эксплуатация и обслуживание пневматических систем обходятся дешевле, чем использование гидравлических аналогов. Системы рассчитаны на длительный срок эксплуатации и устойчивы к износу при регулярном использовании. Пневматические компоненты быстро реагируют на управляющие сигналы.

Устройство должно управляться с помощью избыточного давления 5 атмосфер, с возможностью его регулировки непосредственно на входе в устройство. Необходимо обеспечить постоянную силу давления на оба компонента спаренной трубы клея, чтобы обеспечить клеевой шов равномерной толщины. Также будет возможность быстрой смены использованного клеевого баллона. Стоимость готового изделия не должна превышать 40 тыс. руб.

Принцип работы насадка пневмоподдачи основан на работе воздуха, избыточного давления (рис. 4). При поступлении давления в рабочий цилиндр (3) происходит передача усилия через поршень (2) и штоки (4) на поршни клеевого баллона, в результате чего происходит одновременная подача компонентов клея. Манжета поршня обеспечивает герметизацию рабочей полости, а его разнесенная компоновка препятствует перекоосу внутри цилиндра. Пистолет должен управляться с помощью электроклапана, который при срабатывании управляет подачей избыточного давления в поршневую камеру. При отключении клапана обеспечивается уравнивание давления в поршневой полости с атмосферой.

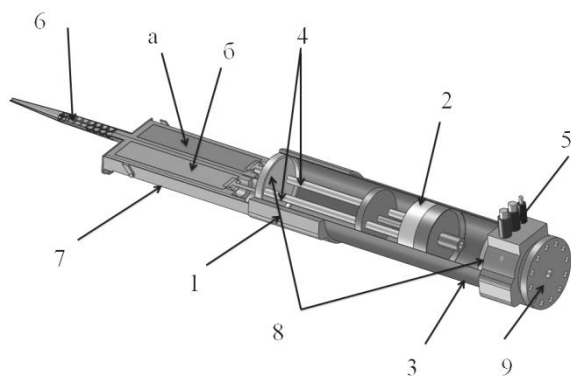


Рис. 4. Насадок пневмоподдачи в разрезе. Основные элементы: 1 – муфта; 2 – поршень с манжетой; 3 – рабочий цилиндр; 4 – толкатели; 5 – система управления пневматикой; 6 – носик-смеситель; 7 – ложемент для картриджа; 8 – торцевые крышки; 9 – монтажный фланец; а – первый компонент клея; б – второй компонент клея

План выполнения работы

При анализе прототипов было установлено, что предлагаемые на рынке решения не удовлетворяют нашим требованиям по параметрам рабочего цилиндра. В ходе эскизного проектирования были определены основные параметры устройства, а также его элементы и типовые детали, которые в последующем будут приобретаться. Основные компоненты пистолета планируется изготовить из алюминиевых

сплавов и полимерных материалов, что обеспечивает легкость конструкции. Также готовый продукт имеет стандартные пневматические разъемы и откидывающийся передний тубовый упор. Он необходим для изъятия использованной тубы и возврата рабочего поршня в исходное положение.

Было осуществлено трехмерное моделирование в первом приближении для определения параметров заготовок и деталей (см. рис. 4). На первом этапе устройство будет испытываться с помощью ручной работы по приобретению манипулятора. По результатам предварительных испытаний будут внесены необходимые коррективы, и устройство будет переведено в автоматический режим. Перспективный комплекс автоматизированной сборки аэродинамических поверхностей должен будет объединять в себе систему базирования элементов, систему выполнения заклепочных швов, систему нанесения клеевого состава, систему фиксации и систему контроля.

На данный момент произведен аналитический расчет для определения параметров пневматического цилиндра, проведено предварительное трехмерное моделирование устройства с учетом готовых элементов и клеевого картриджа. Сейчас модель перерабатывается с учетом компоновочных оснований. По завершении моделирования будет подготовлена конструкторская документация для изготовления деталей и сборки.

Литература

1. Применение волнистой поверхности на хвостовом оперении сверхлегкого летательного аппарата / А.А. Мешков, Ю.В. Мохов, И.Д. Зверков, А.В. Крюков // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов XI МНПК, Иркутск, 13–14 октября 2022 г. – Иркутск: Иркут. ф-л ФГБОУ ВО «ИГТУ ГА», 2022. – Т. 1. – С. 96–103.
2. Разработка технологии изготовления студенческого сверхлегкого планера / Д.А. Матвеев, Ю.В. Мохов, И.Д. Зверков, А.В. Крюков // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов XI МНПК, Иркутск, 13–14 октября 2022 г. – Иркутск: Иркут. ф-л ФГБОУ ВО «ИГТУ ГА», 2022. – Т. 1. – С. 86–95.
3. Интернет-магазин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://aliexpress.ru/item/1005008325159337.html?sku_id=12000044725161805&spm=a2g2w.productlist.search_results.0.5c8d3c347N7kwK, свободный \(дата обращения: 05.09.2025\)](https://aliexpress.ru/item/1005008325159337.html?sku_id=12000044725161805&spm=a2g2w.productlist.search_results.0.5c8d3c347N7kwK, свободный (дата обращения: 05.09.2025)).
4. Интернет-магазин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cosmofen.pro/cat/pu-2k/>

Белозерова Анна Николаевна

Студентка фак-та летательных аппаратов (ФЛА)
Новосибирского гос. технического ун-та (НГТУ)
Эл. почта: elenauch45@gmail.com

Крюков Алексей Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. аэрогидродинамики
(АГД) НГТУ
Эл. почта: a.kryukov@corp.nstu.ru

Р.А. Корчагин, С.М. Губин, Е.С. Шандаров

Дистанционная система управления роботом на базе микроконтроллера ESP-32 и Arduino

Рассмотрена разработка дистанционной системы управления роботом-спасателем для участия в соревнованиях RoboEMERCOM. Пульт дистанционного управления базируется на микроконтроллере ESP-32. Для связи используется протокол Bluetooth.

Ключевые слова: RoboEMERCOM, роботы-спасатели, робототехника, система управления, мобильные роботы.

Мобильные роботы активно используются во многих прикладных задачах. Одной из важнейших задач, где мобильные роботы показывают свою высокую востребованность, является решение задач по спасению людей, разбору завалов и пр. В этой связи актуальным представляется участие в профильных мероприятиях, например, формата соревнований.

Одним из таких турниров является RoboEMERCOM, организованный МЧС России [1]. В этом мероприятии участники должны разработать модель мобильного робота, оснащенного манипулятором и способного передвигаться по полосе препятствий. Полоса препятствий состоит из: участков с различным рельефом, например, поролон, ковролин или камни размером с перепелиное яйцо; подъёмы и спуски с уклоном 25° и длиной от 25 см.; бордюры высотой и шириной 1 см.

Задача робота – преодолеть полосу препятствий как можно быстрее и спасти жертву. Жертвы обозначаются цилиндром 3 см и высотой 5 см. Для спасения жертвы необходимо поместить её в коробку, которая стоит на финише трассы. Длина и ширина коробки 25 см, а высота 15 см. Управление роботом осуществляется дистанционно самим участником.

В данной работе рассматривается разработанная нами оригинальная система дистанционного управления роботом по протоколу Bluetooth.

Основная часть

Для решения задач соревнований RoboEMERCOM мы разработали платформу мобильного робота, оснащенного манипулятором. Изображение платформы приведено на рис. 1.



Рис. 1. Платформа мобильного робота

Мобильная платформа робота-спасателя оснащена четырьмя двигателями постоянного тока, каждый из которых управляется по независимому каналу ШИМ. Для контроля окружающей обстановки используются ультразвуковые датчики. Необходимость наличия манипулятора связана с требованием регламента соревнований «Один шанс на спасение», проходившего в рамках RoboEMERCOM.

Базовым микрокомпьютером для управления роботом является Arduino Mega. Для обеспечения беспроводного доступа мы дооснастили робота модулем HC-06 [2], способным обеспечить прием и передачу сообщений по протоколу Bluetooth. Структурная схема робота представлена на рис. 2.

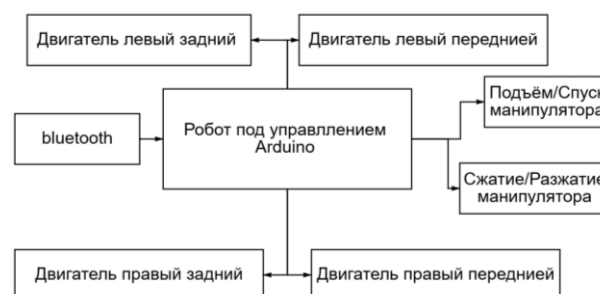


Рис. 2. Структурная схема мобильного робота

Робот передвигается с помощью 4 электродвигателей. Двигатели работают парно, два левых двигателя отвечают за поворот налево, а два правых отвечают за поворот направо. В манипуляторе используется 2 сервопривода. Один отвечает за механизм захвата, а другой – за подъем и спуск.

Таким образом, нам необходимо было обеспечить удаленное управление роботом с поддержкой «аналоговых команд» для движения (для обеспечения движения с поворотами платформы) и двух «цифровых команд» для манипулятора. Под «аналоговыми командами» в данном случае мы понимаем команды, которые включают в себя дополнительную информацию, например, о скорости движения. А под «цифровыми командами» мы понимаем команды, которые робот должен исполнять без дополнительной информации, просто в течение какого-то времени. Время исполнения команды определяется временем нажатия соответствующей кнопки.

Протокол управления

Таким образом, нами были сформулированы требования к протоколу управления: поддержка двух

«аналоговых команд», двух «цифровых команд», реализация односторонней связи, т.е. без отклика от управляемого объекта. На первый взгляд, отсутствие механизма обратной связи (отсутствие отклика) – это минус созданной системы управления, однако в нашем случае механизм обратной связи осуществлялся благодаря визуальному контролю робота оператором.

Набор команд протокола выглядел следующим образом:

- MOTOR1 <скорость>
- MOTOR2 <скорость>
- MANIPULATOR <команда манипулятор>
- SHVAT <команда схват>

Параметр «скорость» варьировал от 0 до 100, параметр «команда манипулятор» имел два значения: UP и DOWN, параметр «команда схват»: ON и OFF.

Схема пульта управления

Для осуществления дистанционного управления роботом был разработан и изготовлен оригинальный пульт. Пульт собран на макетной плате. В качестве микроконтроллера использован ESP32-CAM с встроенным Bluetooth-модулем [3]. Питание от двух батареек типа AAA. Для управления используются 4 тактовые кнопки размером 6×6×5 мм и аналоговый джойстик Amperka, состоящий из двух подстроечных резисторов. Джойстик работает в двух координатах. Для управления передвижением робота используется джойстик. Координата X отвечает за правую пару двигателей, а Y – за левую пару двигателей.

На рис. 3 представлена схема пульта управления. Как видно из схемы, сигнальные выводы X и Y джойстика подключены к входам АЦП платы Arduino, вывод V к питанию 3,3 В, а вывод G – к «земле». Таким образом, мы можем измерять падение напряжения на потенциометрах, которое будет зависеть от положения ручки джойстика. Далее мы нормируем измеренное АЦП значение к диапазону 0–100 и формируем параметр «скорость».

Внешний вид созданного пульта управления приведен на рис. 4.

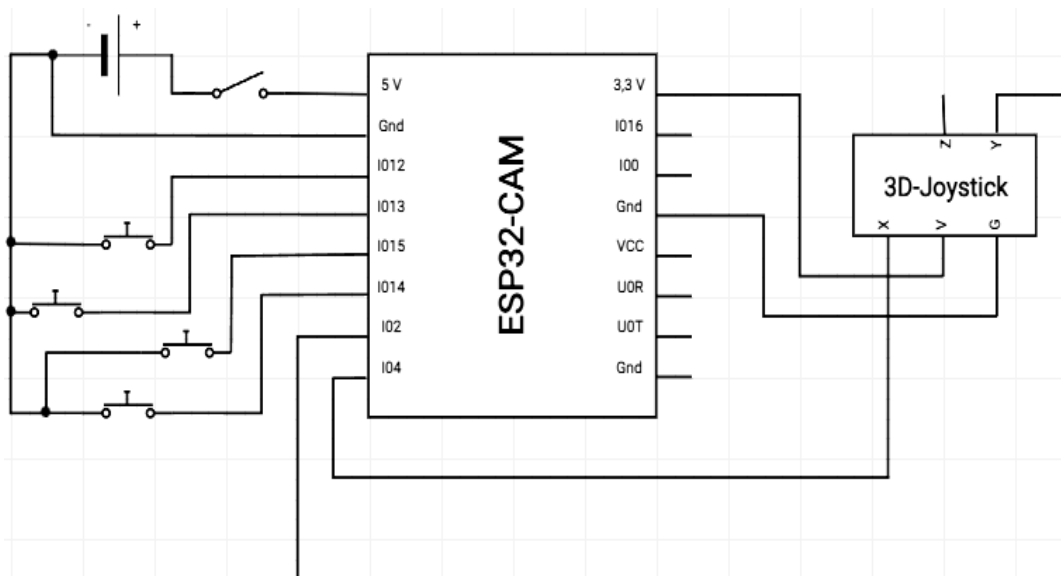


Рис. 3. Схема пульта управления

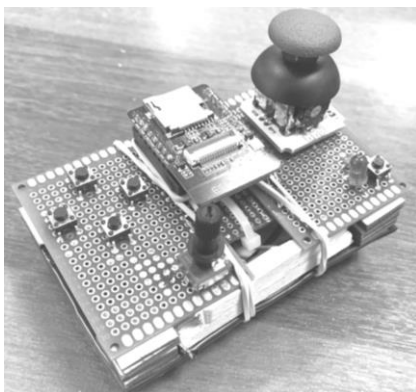


Рис. 4. Внешний вид пульта управления

Манипулятор управляется 4 кнопками, верхняя и нижняя отвечают на подъем и спуск клешни, а левая и правая – за разжатие и сжатие. То есть нажатие на верхнюю кнопку устанавливает значение па-

раметра «команда манипулятор» в UP, нижняя – в DOWN. Нажатие на левую кнопку устанавливает параметр «команда схват» в OFF, на правую – в ON.

Программное обеспечение робота и пульта было разработано в среде Arduino IDE на языке C/C++. ПО пульта обрабатывает данные с кнопок и джойстика, ПО робота получает сообщения через BLE, декодирует их, детектирует команды и формирует управляющие сигналы для приводов робота и манипулятора.

ПО пульта опрашивает состояние портов в бесконечном цикле и, если состояние изменяется, формирует команды роботу, которые отправляются через канал BLE (Bluetooth Low Energy). ПО на стороне робота опрашивает состояние модуля HC-06 и если туда поступила команда, расшифровывает ее в соответствии с протоколом и формирует команды двигателям и сервоприводам.

Заключение

Система дистанционного управления была протестирована на Всероссийском фестивале робототехники RoboEMERCOM 2024. Связь оказалась стабильной, несмотря на большое количество техники, роботов, других систем управления и прочих факторов, пагубно влияющих на качество связи. В результате команда ТУСУРа заняла первое место на соревнованиях.

Литература

1. Положение о проведении робототехнических соревнований «Один шанс на спасение» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://roboemerc.com.ru/polozhenie-odin-shans-na-spasenie/>, свободный (дата обращения: 05.03.2024).

2. Настройка Bluetooth модулей HC-05/06 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robotclass.ru/articles/bluetooth-hc-05-06/?ysclid=mfwdi1znjn245716859>, свободный (дата обращения: 09.03.2024).

3. Программирование модуля ESP32 С помощью Arduino IDE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microkontroller.ru/esp32-projects/programirovanie-modulya-esp32-s-pomoshhyu-arduino-ide/>, свободный (дата обращения: 11.03.2024).

Корчагин Роман Александрович

Студент каф. электронных приборов (ЭП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: ro.ma2005stalker@gmail.com

Губин Сергей Максимович

Студент каф. электронных приборов (ПрЭ) ТУСУРа
Эл. почта: nrfxer20@gmail.com

Шандаров Евгений Станиславович

Ст. преп. каф. ЭП ТУСУРа
Эл. почта: shandarov@mail.ru

Секция 13

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ

СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

*Председатель – **Кориков Анатолий Михайлович**,
проф. каф. АСУ, д.т.н.*

А.П. Белошицкий, Т.В. Ганджа

Сравнительный анализ библиотек с открытым исходным кодом для интеграции метода конечных элементов в отечественную систему компьютерного моделирования MAPC

В условиях импортозамещения и технологических ограничений актуальной задачей становится разработка отечественных систем автоматизированного проектирования. В работе исследуется возможность интеграции метода конечных элементов в систему компьютерного моделирования MAPC для анализа напряженно-деформированного состояния робототехнических систем. Проведен сравнительный анализ открытых библиотек МКЭ по критериям совместимости с языком программирования C++, лицензионной чистоты, кроссплатформенности и производительности. Выделены два перспективных кандидата – FEBio и MFEM, соответствующие всем требованиям проекта. Для окончательного выбора планируется проведение сравнительных испытаний на типовых задачах. Реализация проекта позволит создать конкурентоспособный программный комплекс для прочностного анализа, адаптированный под потребности отечественной промышленности.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, система компьютерного моделирования, MAPC, метод конечных элементов, FEBio, MFEM.

В современных условиях глобальной политической и экономической нестабильности, а также в свете политики импортозамещения, особое значение приобретает разработка национальных программных продуктов, не зависящих от зарубежного программного обеспечения. Это позволяет обеспечить технологическую независимость, повысить безопасность и устойчивость отечественной промышленности, а также снизить риски, связанные с санкциями и ограничениями на использование иностранных решений.

Одной из перспективных отечественных разработок является система MAPC [1], созданная и развиваемая в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Система MAPC представляет собой мощный инструмент для мультифизического компьютерного моделирования, который уже доказал свою эффективность в различных инженерных задачах. Однако для расширения функциональных возможностей системы и обеспечения проведения высокоточного инженерного анализа широкого спектра объектов необходима интеграция специализированной библиотеки, реализующей метод конечных элементов (МКЭ) [2]. Данный инструмент потребуется как для анализа напряженно-деформированного состояния компонентов робототехнических систем, так и для моделирования процессов в химико-технологических системах предприятий нефтегазовой и атомной промышленности, включая расчеты тепломассопереноса, гидродинамики и механики сплошных сред.

Метод конечных элементов является одним из наиболее распространенных и точных численных методов для решения задач механики деформируемого твердого тела, что делает его незаменимым инструментом для прочностного анализа и оптимизации конструкций. Внедрение МКЭ в систему MAPC позволит значительно повысить качество и точность моделирования, а также расширить спектр решаемых задач.

Цель и задачи исследования

Основной целью данной работы является выбор оптимальной библиотеки МКЭ с открытым исходным кодом для интеграции в систему компьютерного моделирования MAPC. Это позволит обеспечить независимость от коммерческих и зарубежных решений, а также гибкость и расширяемость программного комплекса.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определение ключевых критериев отбора библиотек, учитывающих архитектурные особенности системы MAPC, лицензионные ограничения и требования к функциональности.
2. Проведение детального сравнительного анализа существующих открытых и коммерческих решений в области МКЭ.
3. Выделение наиболее перспективных кандидатов для дальнейшего тестирования и интеграции.
4. Разработка плана по проведению сравнительных испытаний и оценке производительности выбранных библиотек на типовых задачах, характерных для робототехнических систем.

Критерии выбора библиотеки МКЭ

Для успешной интеграции библиотеки в систему MAPC были сформулированы следующие основные критерии:

1. Совместимость с языком программирования C++. Поскольку система MAPC разработана на C++, библиотека должна быть либо написана на этом языке, либо иметь удобный и полнофункциональный API для C++. Это обеспечит бесшовную интеграцию и минимизирует затраты на адаптацию.
2. Лицензионные условия. Важным условием является использование разрешительных лицензий (MIT, BSD, Apache), которые позволяют свободно использовать, модифицировать и распространять программное обеспечение, включая коммерческое применение, без сложных юридических ограничений.

3. Кроссплатформенность. Библиотека должна поддерживать основные операционные системы, используемые в промышленности и научных исследованиях, а именно Windows и Linux. Это обеспечит гибкость в выборе аппаратной платформы и сред разработки.

4. Производительность и функциональность. Выбранная библиотека должна эффективно реализовывать метод конечных элементов для решения широкого круга инженерных задач, включая, но не ограничиваясь, механику деформируемого твердого тела, тепломассоперенос и задачи гидродинамики, поддерживать работу с адаптивными сетками, обеспечивать высокую точность и стабильность расчетов. Также важна поддержка параллельных вычислений для ускорения моделирования.

5. Документация и поддержка сообщества. Наличие качественной документации, примеров использования и активного сообщества разработчиков и пользователей значительно облегчает процесс интеграции и дальнейшего сопровождения.

Обзор и сравнительный анализ существующих решений

В ходе анализа рынка программных продуктов для МКЭ были рассмотрены как коммерческие, так и открытые решения.

Коммерческие продукты. ANSYS [3], ABAQUS, COMSOL и другие широко известные коммерческие пакеты обладают высокой функциональностью и производительностью, однако они не соответствуют требованиям открытости и независимости, а также имеют высокую стоимость лицензий и ограничения на модификацию.

Облачные сервисы. Облачные сервисы, такие как CONSELF, OnScale SimScale и другие CAE-платформы, предлагают удобство использования через веб-интерфейс и снижают требования к локальным вычислительным ресурсам. Однако они обладают существенными ограничениями: зависимость от внешних серверов и интернет-соединения, отсутствие полного контроля над исходным кодом и конфиденциальностью данных, а также потенциальные риски, связанные с долгосрочной доступностью сервиса и возможными изменениями в тарифной политике. Эти факторы делают их неприемлемыми для решения критически важных задач в условиях требований импортозамещения и технологического суверенитета.

Открытые библиотеки. В рамках исследования был проведен детальный анализ современных открытых библиотек метода конечных элементов. Среди рассмотренных решений следует выделить:

FreeFEM. Кроссплатформенная среда моделирования с поддержкой мультифизических расчетов, распространяемая под лицензией LGPL. Основным ограничением для интеграции является специализированный скриптовый язык, требующий разработки дополнительных интерфейсов взаимодействия.

GOMA. Специализированный пакет для решения задач гидродинамики и теплопередачи, разрабо-

танный в Sandia National Laboratories. Использование языка Fortran и ограниченная поддержка Windows существенно снижают потенциал интеграции с C++ ориентированной платформой MAPC.

Z88/Z88Aurora. Пакет для прочностного анализа конструкций, имеющий как открытую версию (GPL), так и коммерческое ответвление. Архитектура пакета ориентирована на standalone-приложение, что затрудняет его использование в качестве библиотеки.

Hermes Project. Специализированная библиотека для адаптивных вычислений с поддержкой hp-FEM подходов. Несмотря на мощный математический аппарат, проект имеет сложную архитектуру и ограниченное сообщество пользователей.

Agros2D. Открытая среда мультифизического моделирования с ориентированным на 2D задачи функционалом. Лицензия GPLv3 и ограниченная трёхмерная функциональность не соответствуют требованиям проекта.

По результатам комплексного анализа, учитывающего критерии лицензионной чистоты, архитектурной совместимости и функциональной полноты, были отобраны два наиболее перспективных кандидата для дальнейшего углублённого исследования:

FEBio [4, 5]. Специализируется на биомеханике, распространяется под лицензией MIT, что обеспечивает широкие возможности использования и модификации. Имеет хорошо структурированную документацию и SDK, что облегчает интеграцию. Поддерживает широкий спектр материалов и моделей, что может быть полезно для сложных задач робототехники.

MFEM [6, 7]. Универсальная и высокопроизводительная библиотека с лицензией BSD. Поддерживает адаптивные сетки, параллельные вычисления и интеграцию с современными решателями, такими как Ginkgo. Обладает гибкой архитектурой и хорошо подходит для масштабируемых вычислений.

Заключение

В результате проведенного анализа нескольких известных библиотек с открытым исходным кодом (FreeFEM, GOMA, Z88, Hermes, Agros2D) было установлено, что только два кандидата – FEBio и MFEM – полностью соответствуют всем формальным критериям проекта. Остальные решения были исключены из дальнейшего рассмотрения по таким ключевым признакам, как: несовместимость лицензий, использование неподдерживаемых языков программирования, либо ограниченная функциональность. Таким образом, для углубленного сравнительного анализа были отобраны именно FEBio и MFEM, которые полностью удовлетворяют поставленным требованиям. FEBio выделяется богатой документацией и готовыми моделями материалов, что может ускорить процесс внедрения и адаптации. MFEM, в свою очередь, предлагает высокую производительность и гибкость, особенно на параллельных вычислительных архитектурах, что важно для масштабных и ресурсоемких задач.

Для окончательного выбора необходимо провести комплексное сравнительное тестирование обеих библиотек на наборе типовых задач, характерных для системы МАРС и робототехнических приложений. В ходе тестирования следует оценить:

- реальную производительность и скорость расчетов;
- удобство интеграции и совместимость с существующим кодом;
- соответствие специфическим требованиям моделирования в робототехнике, включая работу с различными материалами и геометриями;
- надежность и стабильность работы при длительных расчетах.

Внедрение выбранной библиотеки МКЭ в платформу МАРС позволит создать готовый к коммерческому использованию программный комплекс для прочностного анализа, адаптированный под нужды российских предприятий. Это решение, построенное на базе проверенных открытых технологий, обеспечит импортонезависимость критически важных процессов проектирования в робототехнике и машиностроении. Реализация проекта создаст основу для разработки конкурентоспособных отечественных продуктов с высокой добавленной стоимостью и укрепит позиции российских производителей на мировом рынке высокотехнологичной продукции.

Литература

1. Дмитриев В.М. Структура сетевой многоуровневой компьютерной модели в формате метода компонентных цепей для реализации сетевых виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, А.С. Болденков // Программные системы: теория и приложения. – 2024. – № 1 (165). – С. 24–33. <https://elibrary.ru/item.asp?id=71311346>.

2. Barghi Kherzeloo A. Nonlinear Site Response Analysis by Coupling Scaled Boundary Finite Element Method and Finite Element Method // Acta Geodynamica et Geomateri-

alia. – 2020. – P. 397–412. DOI: 10.13168/agg.2020.0029. <https://elibrary.ru/item.asp?id=76902272>

3. Даниленко Д.В. Применение конечно-элементных пакетов ANSYS, ANSYS Workbench и LS-DYNA в расчетах вагонных конструкций / Д.В. Даниленко, А.С. Власко // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 8. – С. 58–60. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9535608>.

4. Finite Element Implementation of Computational Fluid Dynamics with Reactive Neutral and Charged Solute Transport in FEBio / Ja.J. Shim, S.A. Maas, J.A. Weiss, G.A. Ateshian // Journal of Biomechanical Engineering. – 2023. – Vol. 145, No. 9. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61574392>

5 FEBio Finite Element Model of a Pediatric Cervical Spine / S.M. Finley, J.H. Astin, E. Joyce et al. // Journal of Neurosurgery: Pediatrics. – 2022. – Vol. 29, No. 2. – P. 218–224. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=57606909>.

6. The target-matrix optimization paradigm for high-order meshes / V. Dobrev, T. Kolev, V. Tomov et al. // SIAM Journal on Scientific Computing. – 2019. – Vol. 41, No. 1. – P. B50–B68. DOI 10.1137/18M1167206.

7. MFEM: A Modular Finite Element Methods Library / R. Anderson, Andrej Ju., A. Barker, J.A. Bramwell, J.S. Camier, J.A. Cervený, V. Dobrev, Y. Dudouit, A. Fisher, T. Kolev, W. Pazner, M. Stowell, V. Tomov, I. Akkerman, J. Dahm, D. Medina, S. Zampini // Computers & Mathematics with Applications. – 2021. – Vol. 81. – P. 42–74. DOI: 10.1016/j.camwa.2020.06.009. <https://elibrary.ru/item.asp?id=72391870>.

Белошицкий Артём Павлович

Студент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: belo4ickiq@gmail.com

Ганджа Тарас Викторович

Д-р техн. наук, проф. каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: gtv@main.tusur.ru

О.М. Субботина, М.Е. Туманов, А.С. Садкова, А.Е. Боровская

Серверные компоненты React: новые возможности для автоматизации и оптимизации систем управления

Рассматривается влияние архитектуры серверных компонентов React (RSC) на поисковую оптимизацию (SEO) веб-интерфейсов для систем управления, анализируются ключевые преимущества подхода и уменьшение размера клиентского JavaScript-бандла. А также, приводятся рекомендации по интеграции RSC в современные проекты.

Ключевые слова: React, серверные компоненты, SEO, производительность, веб-интерфейсы, системы управления, клиент-серверная архитектура.

В современном мире веб-разработки создание эффективных веб-приложений для систем управления и обработки данных становится всё более актуальной задачей. При этом программисты сталкиваются с тем, что нужно сделать не только высокую интерактивность приложений, но и их корректную индексацию поисковыми системами, то есть процесс, при котором поисковые роботы сканируют веб-страницы и добавляют информацию о них в базу данных поисковой системы.

Одностраничные приложения (SPA) на базе React, хоть и имеют преимущества в плане пользовательского опыта, но ещё и имеют ряд ограничений. Основные проблемы таких приложений связаны с тем, что:

- поисковым роботам требуется время на обработку JavaScript-кода;
- объём клиентского JavaScript-кода часто оказывается избыточным;
- динамический контент обрабатывается поисковыми системами с определёнными сложностями [1].

Ситуация изменилась с появлением серверных компонентов React (RSC) в версии 18. Этот абсолютно новый подход позволяет выполнять первичный рендеринг на стороне сервера, что очень сильно улучшает как пользовательский опыт, так и SEO.

Эта проблема особенно актуальна, потому что современные системы требуют повышения эффективности за счёт оптимизации пользовательских интерфейсов, а использование RSC открывает новые возможности для построения гибридных приложений, сочетающих преимущества клиентской и серверной обработки данных.

Принципы работы серверных компонентов и их отличие от SSR

Появление серверных компонентов в React (React Server Components, RSC) – это важный этап в развитии технологий рендеринга пользовательских интерфейсов. До их появления разработчики применяли два основных подхода рендеринга.

Первый – клиентский рендеринг (CSR) – заключался в том, что весь интерфейс формировался в браузере. Это часто приводило к перегрузке клиентских устройств избыточным JavaScript-кодом и увеличению времени первой отрисовки (First Contentful Paint, FCP) [1].

Второй подход – серверный рендеринг с гидратацией (SSR) – позволял формировать страницу на сервере, но для активации интерактивности требовалась повторная обработка на клиенте, что увеличивало нагрузку и усложняло разработку [2].

В отличие от этих методов, RSC позволяют распределять вычислительные задачи между клиентом и сервером на уровне отдельных компонентов. При этом часть логики и ресурсоёмкие операции остаются на сервере, а интерактивные элементы интерфейса обрабатываются на клиенте. На практике это улучшает отзывчивость приложений и снижает нагрузку на устройства пользователей [2].

Для современных систем управления и обработки информации стало особенно важно выполнять ресурсоёмкие операции на сервере (например, агрегацию больших массивов данных или обработку запросов к базам) и предоставлять пользователю готовый результат с минимальной задержкой.

Влияние серверных компонентов на ключевые метрики производительности и индексацию

Оптимизация процессов. Внедрение серверных компонентов React оказывает заметное влияние не только на показатели производительности веб-интерфейсов, но и на эффективность работы систем управления. Их использование позволяет по-новому организовать взаимодействие клиента и сервера, снизить нагрузку на устройства пользователей и ускорить обработку данных.

RSC индивидуально извлекают данные и полностью отображаются на сервере, а полученный HTML-код передается в дерево компонентов React на стороне клиента, чередуясь с другими серверными и клиентскими компонентами по мере необходимости. Этот процесс устраняет необходимость повторного рендеринга на стороне клиента, тем самым улучшая производительность. Для любых клиентских компонентов гидратация может происходить одновременно с потоковой передачей RSC, поскольку вычислительная нагрузка распределяется между клиентом и сервером. Другими словами, сервер, гораздо более мощный и физически ближе к вашим источникам данных, занимается вычислительно-интенсивным рендерингом и отправляет клиенту только интерактивные фрагменты кода.

Когда RSC необходимо перерисовать из-за изменения состояния, он обновляется на сервере и плавно встраивается в существующий DOM без жесткого обновления. В результате состояние клиента сохраняется, даже когда части представления обновляются с сервера [5].

Работа с динамическим контентом и индексация. Одной из основных трудностей при использовании традиционных SPA-приложений является то, что поисковые системы вынуждены самостоятельно выполнять JavaScript-код, чтобы получить итоговое содержимое страницы и это часто замедляет процесс индексации и может приводить к неполному учёту данных, то есть если загружается медленно, поисковые роботы могут иметь ограниченное время для индексации страниц, что приведет к неполной индексации. Серверные компоненты решают эту проблему: поисковый робот получает уже готовую HTML-страницу, которую можно индексировать без задержек и для систем управления это означает более быструю доступность информации и корректное представление данных во внешних и внутренних сервисах [3].

Сокращение времени отклика. Так как часть вычислений переносится на сервер, пользователь сразу получает содержимое страницы/компонента, без ожидания, пока придёт весь JS-бандл и прогрузится состояние приложения. Нет этапа повторного рендеринга на клиенте для тех частей, что уже отрисованы на сервере. Это положительно сказывается на показателе First Contentful Paint (FCP) и общем восприятии приложения [2]. В системах управления и обработки информации — это особенно важно: чем быстрее оператор получает доступ к актуальным данным, тем быстрее он может принимать решения.

Снижение требований к клиентским устройствам. Код серверных компонентов не включается в клиентский JavaScript-бандл, благодаря чему уменьшается общий объём загружаемого кода [4]. В свою очередь, это снижает нагрузку на браузер и позволяет комфортно работать даже на менее производительных устройствах, включая мобильные.

Уменьшается размер бандла, ведь код серверных компонентов вообще не попадает в клиентский JS. Например, если вы используете тяжелую библиотеку для рендеринга Markdown или графиков, ее можно подключить в серверном компоненте, тогда она выполнится на сервере и пользователю не придется тянуть сотни килобайт этой библиотеки в браузер.

Таким образом, системы управления становятся доступнее для более широкой аудитории.

Повышение безопасности. Использование серверных компонентов React также оказывает положительное влияние на уровень безопасности веб-приложений. Во-первых, конфиденциальная логика (например, ключи API, параметры подключения к базам данных, данные аутентификации и другие чувствительные сведения) остаётся полностью на

сервере и не передаётся на клиентскую сторону. Это снижает риск утечки информации через браузер или инструменты отладки [2].

Во-вторых, необходимость в создании отдельных REST или GraphQL API для простых операций может отпадать: многие действия выполняются непосредственно в серверных компонентах. Это уменьшает количество потенциальных точек входа для злоумышленников и снижает вероятность атак, связанных с неправильной конфигурацией API [2].

Кроме того, такой подход помогает ограничить поверхность атак, так как клиент получает только необходимый результат работы компонента в виде HTML или минимального набора данных. Это усложняет проведение атак, связанных с инъекциями или перехватом логики обработки.

В совокупности все эти факторы делают архитектуру приложений на основе RSC более устойчивой к распространённым угрозам и повышают общий уровень защищённости корпоративных и промышленных систем управления.

В целом, использование серверных компонентов даёт большие преимущества: интерфейсы становятся быстрее, данные обрабатываются эффективнее, а SEO улучшается.

Заключение

Серверные компоненты React (RSC) сейчас очень нужны для развития архитектуры веб-приложений. Они меняют традиционный подход к построению интерфейсов, позволяя более рационально распределять вычислительные задачи между клиентом и сервером.

Для систем управления и обработки информации это даёт несколько практических преимуществ. Во-первых, повышается скорость загрузки интерфейсов, что ускоряет доступ к данным и улучшает работу пользователей. Во-вторых, снижаются требования к оборудованию, позволяя комфортно использовать приложения даже на слабеньких устройствах. В-третьих, упрощается работа с динамическими данными.

В совокупности эти изменения повышают надёжность и эффективность информационных систем. Таким образом, применение серверных компонентов React можно рассматривать как перспективное направление для разработки современных веб-интерфейсов и систем управления, которое сочетает удобство для пользователя, оптимизацию ресурсов и SEO.

Литература

1. JavaScript SEO | Google Search Central [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developers.google.com/search/docs/advanced/javascript/javascript-seo-basics>, свободный (дата обращения: 10.09.2025).
2. Серверные компоненты в React [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/beeline_cloud/articles/931800/, свободный (дата обращения: 10.09.2025).
3. Гарантии индексации: что реально работает в 2025 году? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://vc.ru/dev/1889047-garantii-indeksatsii-saitov-v-2025-godu>, свободный (дата обращения: 11.09.2025).

4. Компоненты React Server [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://reactdev.ru/reference/rsc/server-components/>, свободный (дата обращения: 11.09.2025).

5. Understanding React Server Components [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vercel.com/blog/understanding-react-server-components>, свободный (дата обращения: 13.09.2025).

Субботина Олеся Максимовна

Студентка ТУСУРа

Эл. почта: olesya_subbotina_04_03_04@mail.ru

Садкова Анна Сергеевна

Студентка ТУСУРа

Эл. почта: annasadkova20479932@gmail.com

Боровская Ангелина Евгеньевна

Студент ТУСУРа

Эл. почта: http://br_ang@mail.ru

Туманов Максим Евгеньевич

Студент Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Эл. почта: tum0anov@mail.ru

Д.А. Дашкевич, А.Е. Карелин

Применение методов аугментации данных для повышения точности идентификации зернистых сыпучих материалов.

Рассмотрен комплекс аугментационных преобразований изображений, позволяющий увеличить объем обучающих данных и улучшить обобщающую способность распознавания параметров зернистых сыпучих материалов.

Ключевые слова: аугментация, обучение, зернистый сыпучий материал, машинное зрение, фракция, щебень, модель, YOLOv8, метрика.

Контроль качества щебня является важной задачей строительной отрасли, так как от правильного подбора и использования фракций зависит прочность и долговечность дорожных покрытий и бетонных конструкций. Согласно требованиям ГОСТ 8267–93 [1], щебень подразделяется на группы по фракциям, и соблюдение этих норм является обязательным на всех этапах строительства.

В процессе производства и транспортировки строительных материалов возникает задача оперативного распознавания щебня и последующего определения его фракционного состава. На этапе погрузки и доставки в кузовах самосвалов зачастую отсутствует возможность идентифицировать материал и его фракцию.

Традиционно определение фракции щебня выполняется визуально квалифицированным персоналом, с применением простых измерительных приборов или в лабораторных условиях с применением наборов сит с отверстиями для различного диаметра фракций, что требует значительных временных и трудовых затрат. В реальных производственных процессах есть возможность получать визуальный контроль отгружаемого материала. Реализовано это может быть путем установки камер позволяющий снимать кузов самосвала и щебня, который в нем находится во время транспортировки. При этом условия съёмки могут быть далеки от идеальных: дождь, темное время суток, размытые изображения при движении транспорта или загрязнения объектива при плохой погоде, которые в ходе существенно снижают точность распознавания.

В этой связи актуальной становится задача применения методов компьютерного зрения и машинного обучения для автоматизированного определения фракций щебня в реальных производственных условиях, что позволит нам исключить человеческий фактор принятия решения, сократить время, в течении которого может быть получен результат. Одним из ключевых направлений повышения качества работы таких систем является использование аугментации данных, позволяющей увеличить объем обучающей выборки и повысить устойчивость модели YOLOv8 к внешним искажениям.

В качестве алгоритма распознавания использовалась современная архитектура YOLOv8. Она представляет собой значительную эволюцию в серии YOLO, отличаясь подходом обнаружения, что

упрощает архитектуру модели и улучшает обобщение для различных наборов данных. Ее гибкая базовая сеть и оптимизированные функции потерь способствуют повышению точности и более стабильному обучению [6].

Методы и материалы исследования.

Аугментация в детекции изображений – это процесс искусственного расширения обучающего набора данных с помощью различных преобразований исходных изображений (например, изменения ракурса, масштаба, поворота, яркости, контраста, добавления шума и прочего). Цель аугментации – повысить разнообразие данных, улучшить обобщающую способность модели и сделать её устойчивой к вариациям, которые встречаются в реальных условиях. Благодаря этим трансформациям модель учится распознавать объекты более надежно при разных условиях, снижая риск переобучения и улучшая точность определения объектов [2].

Аугментация очень важна в детекции объектов. Она позволяет увеличить эффективный размер обучающего набора без сбора новых данных, вносит вариативность, имитируя реальные искажения (шумы, изменения освещения, ракурсы, окклюзии), формирует более робастные и информативные признаки для модели, улучшает способность модели распознавать объекты в различных контекстах и ситуациях [3].

Для проведения исследования были собраны изображения из производства, включающие в себя около 20 разных изображений щебня. Данные имели разное качество, так как были получены с камеры, которая фиксировала кузов самосвала в разных условиях. На начальном этапе присутствовал один класс – «щебень», что позволило сосредоточиться на задаче бинарной классификации: определение наличия щебня на изображении.

Для повышения устойчивости модели к внешним факторам и расширения обучающей выборки применялись встроенные методы аугментации, применяемая в данной задаче, реализованная в среде YOLO. Среди используемых преобразований – повороты, отражения, масштабирование, случайные сдвиги, а также изменение яркости и контрастности изображений. Это позволило искусственно увеличить разнообразие данных и смоделировать условия, характерные для производства: вариации освещенности, шумы и смазывание.

Результаты экспериментов

Для оценки эффективности применения аугментации была проведена серия экспериментов с моделью YOLOv8 определение параметров зернистых сыпучих материалов. Рассматривались два варианта обучения, как с использованием аугментации, так и без нее (рис. 1–8).

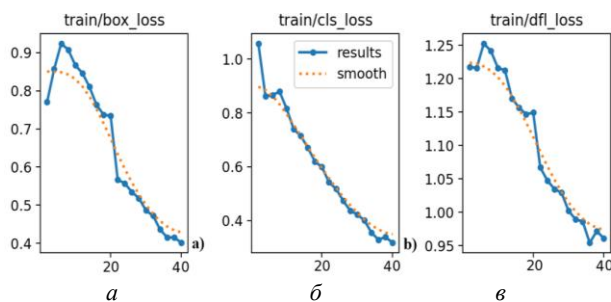


Рис. 1. Функции потерь на обучающем наборе без аугментации

Функция потерь на обучающем наборе – это числовая мера ошибки, показывающая, насколько предсказания модели отличаются от истинных значений для данных, на которых модель обучается. Основная цель обучения – минимизировать это значение функции потерь, чтобы модель лучше соответствовала обучающим данным [4].

По оси X – номер эпохи обучения, по оси Y – величина ошибки (loss).

train/box_loss (рис. 1, а) характеризует точность локализации объектов, train/cls_loss (рис. 1, б) отражает корректность классификации, train/dfl_loss (рис. 1, в) уточняет регрессию координат. Для всех показателей наблюдается устойчивая тенденция к снижению, что подтверждает эффективное обучение модели.

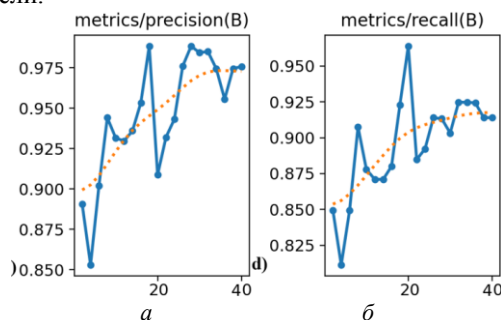


Рис. 2. Показатели точности и полноты без аугментации

Точность (Precision) и полнота (Recall) – это ключевые метрики для оценки качества моделей машинного обучения, особенно в задачах классификации и детекции объектов.

Точность показывает, какую долю из всех объектов, которые модель определила как положительные, действительно являются положительными.

Полнота показывает, какую долю всех действительно положительных объектов модель смогла правильно обнаружить [5].

По оси X – эпохи, по оси Y – значения метрик (от 0 до 1).

Precision (рис. 2, а) достигает уровня около 0,97, что свидетельствует о низкой доле ложноположительных предсказаний. Recall (рис. 2, б) растёт до примерно 0,92, что указывает на способность модели обнаруживать большую часть объектов.

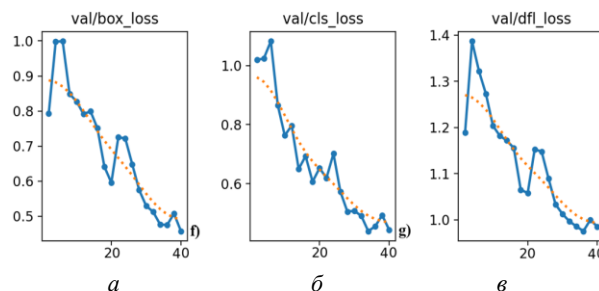


Рис. 3. Функции потерь на валидационном наборе без аугментации

Функция потерь на валидационном наборе – это мера ошибки, которая оценивает, насколько хорошо обученная модель предсказывает данные, которые не использовались при обучении (валидационные данные). Она служит для оценки способности модели обобщать знания на новые, ранее невидимые примеры [4].

Динамика ошибок (val/box_loss, val/cls_loss, val/dfl_loss) в целом соответствует обучающему набору, что говорит об отсутствии значимого переобучения.

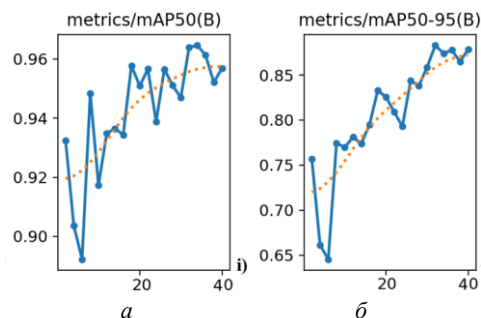


Рис. 4. Интегральные метрики качества (mAP) без аугментации

Интегральные метрики качества – это комплексные показатели, которые объединяют несколько аспектов оценки работы моделей машинного обучения. Они дают более сбалансированную и объективную картину о результатах работы модели, особенно в задачах классификации и детекции.

mAP (mean Average Precision): среднее значение AP по всем классам, популярна в задачах мультиклассовой детекции и классификации [5].

По оси X – эпохи, по оси Y – значения интегральной метрики.

mAP@0.5 (рис. 4, а) достигает около 0,96, mAP@0.5 – 0,95 (рис. 4, б) растёт до 0,87. Это подтверждает высокое качество как детекции, так и локализации объектов.

Тенденция к снижению сохраняется. Значения train/box_loss и train/cls_loss уменьшаются более

стабильно по сравнению с обучением без аугментации, что отражает повышение устойчивости модели.

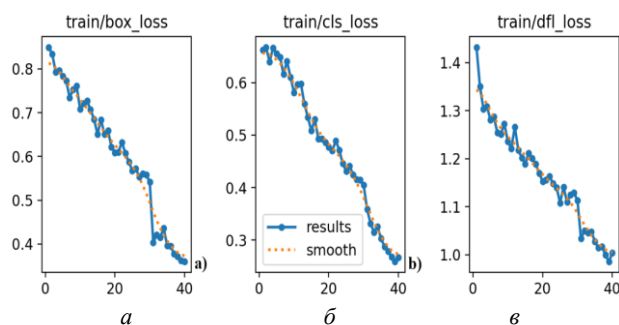


Рис. 5. Функции потерь на обучающем наборе с аугментацией

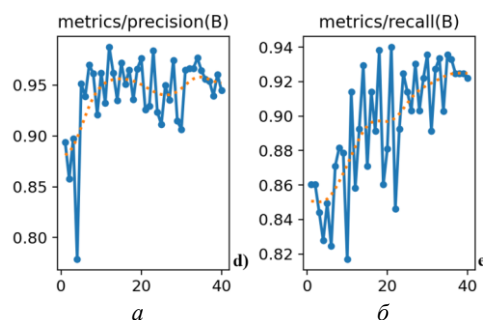


Рис. 6. Показатели точности и полноты с аугментацией

Значения Precision находятся на уровне 0.95–0.96, Recall достигает около 0.92, причём кривая полноты менее подвержена колебаниям, чем без аугментации. Это указывает на улучшение способности модели находить объекты в условиях изменчивости данных.

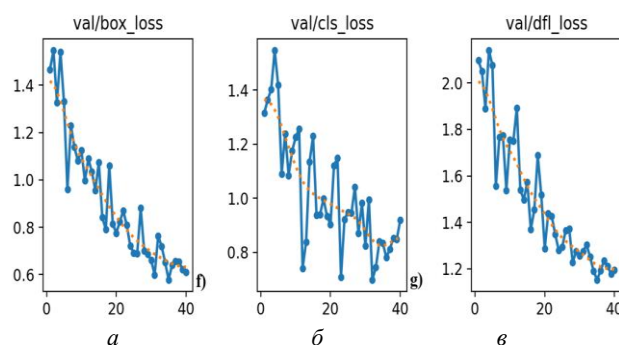


Рис. 7. Функции потерь на валидационном наборе с аугментацией

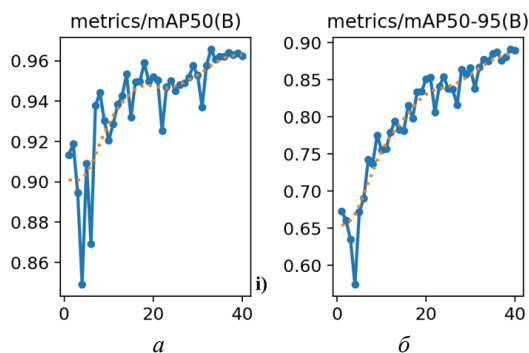


Рис. 8. Интегральные метрики качества (mAP) с аугментацией

Значения ошибок выше, чем на обучении, но плавно снижаются и характеризуются меньшей вариативностью по сравнению с графиками без аугментации. Это подтверждает лучшую обобщающую способность модели.

mAP@0.5 достигает уровня около 0,96, аналогичного обучению без аугментации. При этом mAP@0.5 – 0,95 повышается до 0,89, что указывает на более точную локализацию объектов при строгих критериях совпадения.

Вывод

Для решения задачи детекции объектов в реальном времени, применение аугментации повышает устойчивость модели YOLOv8 к вариативности входных данных, улучшает полноту детекции и увеличивает точность локализации объектов. В практическом аспекте это позволяет рекомендовать использование аугментации при обучении моделей идентификации параметров зернистых сыпучих материалов, особенно в случаях ограниченного объёма исходной выборки.

Литература

- ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – Введ. 1995-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 14 с.
- Искусство аугментации: как улучшить модели компьютерного зрения без сбора новых данных [Электронный ресурс] / Magnus Tech (Habr). – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/magnus-tech/articles/850070/>; свободный (дата обращения: 04.09.2025).
- Аугментация данных с использованием Ultralytics YOLO [Электронный ресурс] / Ultralytics. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-data-augmentation/#introduction>; свободный (дата обращения: 05.09.2025).
- Ultralytics. Глоссарий: Функция потерь (loss-function) [Электронный ресурс] / Ultralytics. – Режим доступа: <https://www.ultralytics.com/ru/glossary/loss-function>; свободный (дата обращения: 07.09.2025).
- Bazhenov Д. Оценка классификатора (точность, полнота, F-мера) [Электронный ресурс]: блог «Bazhenov.me». – 21 июля 2012. – Режим доступа: <https://www.bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html>; свободный (дата обращения: 09.09.2025).
- Ultralytics YOLO. Сравнение моделей: YOLOv8 против YOLOv10 для обнаружения объектов [Электронный ресурс]: Ultralytics. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/ru/compare/yolov8-vs-yolov10/#ultralytics-yolov8-versatility-and-maturity>; свободный (дата обращения: 14.09.2025).

Карелин Алексей Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
Эл. почта: aleksei.e.karelin@tusur.ru

Дашкевич Данил Александрович

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: Dashkevich_Danil@mail.ru

И.С. Федорцов

Проблематика и постановка задачи разработки программного модуля для автоматизированной инвентаризации лесов на основе анализа изображений

Разработка программного модуля для автоматизированного аннотирования и определения параметров деревьев на основе анализа их крон по изображениям, полученным с БПЛА.

Ключевые слова: лесотаксация, автоматизация, сегментация крон, биометрические параметры деревьев, лесной мониторинг, цифровая трансформация, устойчивое лесопользование, климатическая политика, инвентаризация лесов, дистанционное зондирование.

Современное лесное хозяйство находится в ситуации, когда задачи мониторинга и инвентаризации становятся всё более масштабными и требовательными. Леса – это не только источник древесины, но и важнейший элемент экологического баланса, регулирующий климат, водные ресурсы и биоразнообразие. От полноты и точности информации о состоянии лесных массивов зависит эффективность лесопользования, выполнение природоохранных программ и участие страны в международных углеродных инициативах.

Традиционные методы измерения параметров деревьев, таких как высота, диаметр ствола и площадь кроны, основаны на натурных обследованиях и требуют значительных трудовых и временных затрат. Работа таксаторов в полевых условиях предполагает использование мерных лент, высотомеров, буравов и другой специализированной техники. Несмотря на отработанность методик, такие обследования сопряжены с рядом серьёзных ограничений.

Во-первых, они чрезвычайно трудоёмки. Для того чтобы провести инвентаризацию лесного участка площадью всего 1 км², специалисту требуется более 170 часов работы. Это практически месяц полевых исследований, выполняемых одним человеком. Если учесть масштаб российских лесов, где общая площадь лесных фондов превышает 800 млн гектаров, становится очевидно, что обеспечить оперативное и регулярное обследование такими методами невозможно.

Во-вторых, традиционные подходы не позволяют охватывать большие территории. Таксация проводится выборочно, на ограниченных пробных площадях, а результаты экстраполируются на всю территорию. Такой подход снижает точность данных, поскольку состояние леса может существенно варьироваться даже в пределах одного квартала.

В-третьих, качество полевых измерений зависит от человеческого фактора. Разные специалисты могут по-разному интерпретировать методики измерений, а неблагоприятные погодные условия и сложный рельеф дополнительно повышают вероятность ошибок. В итоге в официальных отчётах часто появляются статистические погрешности, которые снижают доверие к данным лесоинвентаризации.

Особенно остро проблемы проявляются в труднодоступных районах. В северных и восточных регионах России, где отсутствует развитая дорожная сеть, доставка специалистов к месту работ требует вертолётных перелётов или длительных пеших маршрутов. Это многократно увеличивает стоимость каждого обследования и делает систематический мониторинг невозможным. Между тем именно эти территории имеют огромное значение для климата и экологии, так как сосредотачивают значительные углеродные резервы.

Не менее важным фактором является необходимость регулярного обновления данных. Леса подвержены естественным и антропогенным изменениям: пожары, санитарные рубки, вредители и болезни деревьев ежегодно изменяют структуру насаждений. Чтобы оперативно реагировать на такие вызовы, требуется системный мониторинг, который в традиционной форме оказывается слишком дорогим и медленным.

Таким образом, современная практика лесоинвентаризации сталкивается с проблемами: высокой стоимостью, длительными сроками проведения, ограниченным пространственным охватом и значительными рисками ошибок. Эти обстоятельства существенно снижают эффективность работы лесного хозяйства, препятствуют оперативному принятию управленческих решений и ограничивают возможности участия в международных климатических инициативах.

В этой связи особую актуальность приобретает поиск новых подходов, основанных на автоматизации анализа лесных массивов.

Автоматизация позволит резко сократить трудовые затраты, увеличить скорость и точность получения информации, а также обеспечить возможность регулярного мониторинга больших территорий.

Это открывает перспективы для создания единой цифровой системы управления лесными ресурсами, которая сможет стать основой устойчивого лесопользования и экологической безопасности.

На рынке в последние годы появилось значительное количество коммерческих и исследовательских программных продуктов, ориентированных на анализ лесных данных и автоматизацию обработки изображений.

Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, которые важно учитывать при выборе инструмента для конкретных задач. Существующие программные решения:

- eCognition (Trimble) – это один из наиболее известных инструментов объектно-ориентированного анализа изображений. Он поддерживает работу не только с обычными аэрофотоснимками, но и с данными LiDAR, что позволяет строить трёхмерные модели лесных массивов. Программный комплекс широко используется в научных исследованиях и при выполнении кадастровых работ, однако его существенным недостатком является высокая стоимость лицензий и сложность обучения персонала. Для образовательных и исследовательских учреждений такой инструмент часто оказывается недоступным.

- ArcGIS Pro + deep learning – позволяет интегрировать пользовательские алгоритмы машинного обучения, что делает систему гибкой и универсальной. Поддерживается создание кастомных моделей сегментации, визуализация пространственных данных и работа с большими массивами информации. Вместе с тем ArcGIS требует дорогостоящих лицензий и значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает его применение при массовом внедрении. В ряде случаев стоимость программного обеспечения и аппаратного обеспечения становится сопоставимой с затратами на проведение традиционных таксационных работ.

- SEPAL (FAO) – это облачная система, разработанная Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН, которая предоставляет бесплатный доступ к инструментам анализа спутниковых данных. Она активно используется в странах с ограниченными ресурсами и позволяет выполнять мониторинг вырубок, пожаров и изменений в лесном покрове. Однако система ориентирована преимущественно на работу с данными среднего разрешения и не предназначена для анализа отдельных деревьев или расчёта детальных биометрических параметров. В условиях, когда требуется точная информация о структуре насаждений, возможностей SEPAL оказывается недостаточно.

- DeepForest, U-Net, SAM – это архитектуры, представляющие собой мощные инструменты в области сегментации изображений, которые активно используются в академических проектах.

- DeepForest разработан для автоматического выделения крон деревьев на аэрофотоснимках, однако модель в основном обучена на данных Северной Америки и плохо переносится на российские условия.

- U-Net, созданный для медицинской сегментации, продемонстрировал хорошие результаты и в экологии, но испытывает трудности при работе с перекрывающимися кронами.

- SAM позиционируется как универсальное средство сегментации любых объектов, но требует больших вычислительных мощностей и зачастую ручной корректировки результатов.

Все перечисленные модели представляют интерес для исследований, однако их практическая применимость в условиях отечественного лесного хозяйства пока ограничена.

Анализ существующих решений позволяет сделать вывод, что на данный момент отсутствует универсальная система, которая одновременно обеспечивала бы высокую точность, доступность и адаптированность к разнообразным условиям российских лесов. Это подчеркивает необходимость разработки специализированных программных средств, ориентированных именно на задачи отечественной лесоинвентаризации.

Цель исследования заключается в анализе существующих решений и постановке задачи по разработке специализированного программного модуля, ориентированного на автоматизацию инвентаризации лесов на основе анализа изображений.

Основные задачи, которые ставятся в рамках разработки, можно сформулировать следующим образом:

- автоматическое распознавание и аннотирование крон деревьев на изображениях различного происхождения (аэрофотосъёмка, БПЛА, спутниковые снимки высокого разрешения);

- подготовка данных для дальнейших расчётов биометрических характеристик (высота, диаметр ствола, площадь кроны) с возможностью интеграции в лесоинвентаризационные базы;

- адаптация модуля к разным породам деревьев и условиям съёмки, что особенно важно для многообразия российских лесов;

- обеспечение масштабируемости решения для работы как с небольшими учебными участками, так и с обширными лесными массивами в рамках национальных проектов;

- снижение стоимости и времени проведения инвентаризационных работ за счёт автоматизации рутинных операций.

Таким образом, предлагаемое исследование направлено на восполнение существующего пробела между дорогостоящими зарубежными системами и ограниченными возможностями доступных.

Развитие цифровых технологий в лесном хозяйстве открывает принципиально новые возможности для мониторинга и инвентаризации природных ресурсов. Проведённый анализ показал, что традиционные методы таксации, несмотря на свою проверенность временем, уже не способны в полной мере удовлетворять современные потребности. Высокие затраты труда и времени, ограниченность пространственного охвата и риск ошибок при полевых измерениях делают их малоэффективными в условиях, когда требуется оперативный и масштабный сбор информации.

Особенно остро данная проблема проявляется в России, где огромные площади лесов сочетаются с крайне неравномерной транспортной доступностью. В северных и восточных регионах доставка специалистов к месту обследований требует значительных

финансовых затрат, а скорость проведения работ становится критически низкой. В результате данные о состоянии лесных массивов нередко устаревают ещё до того, как попадают в отчёты и государственные реестры.

При этом потребность в актуальной информации возрастает год от года. Лесные ресурсы играют ключевую роль в углеродном балансе планеты, и точные данные о запасах биомассы становятся важным инструментом в международных климатических соглашениях. Кроме того, растёт спрос на аналитическую информацию в смежных областях: в экологии, где требуется оценка биоразнообразия и состояния экосистем; в экономике, где леса рассматриваются как часть национального богатства; в социальной сфере, где важно планирование рекреационных зон и сохранение культурного наследия.

Именно поэтому разработка систем автоматизации анализа лесных изображений и инвентаризационных данных представляется крайне актуальной. Внедрение подобных решений позволит:

- значительно ускорить процесс сбора и обработки информации;
- снизить стоимость проведения таксационных работ за счёт сокращения полевых выездов;
- повысить точность и объективность результатов, исключив влияние человеческого фактора;
- обеспечить возможность регулярного мониторинга больших территорий в режиме, близком к реальному времени;
- интегрировать результаты в национальные и международные базы данных для решения экологических и климатических задач.

Таким образом, необходимость перехода от традиционных методов к автоматизированным системам анализа является не только техническим вопросом, но и стратегическим направлением развития лесного хозяйства.

Создание специализированных программных модулей позволит сформировать основу для цифровой трансформации отрасли, повысить её эффективность и обеспечить более ответственное отношение к природным ресурсам.

Настоящая работа представляет собой постановку задачи и обоснование её актуальности. В дальнейшем планируется сосредоточиться на выборе оптимальных методов реализации, проектировании архитектуры программного комплекса и его апробации на реальных данных. Это позволит получить практические результаты, которые могут быть внедрены как в исследовательскую, так и в производственную практику.

Литература

1. ОС ТУСУР 01–2021 работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС_ТУСУР_01-2021_\(согласовано\).pdf?1642386839](https://regulations.tusur.ru/storage/150499/ОС_ТУСУР_01-2021_(согласовано).pdf?1642386839), свободный (дата обращения: 12.09.2024).

2. Разработка веб-сервиса для оформления учебных документов / И.С. Федорцов, А.Е. Тихонов, Д.А. Ермаков, Е.И. Бадьин, М.М. Боровиков, Е.А. Прец, В.А. Забавнова // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XIX междунар. науч.-практ. конф. (15–17 ноября 2023 г.): в 2 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), 2023. – Ч. 2. – С. 76–78.

3. Microsoft Edge [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/microsoft-edge/web-platform/web-platform> (дата обращения: 12.09.2024).

Федорцов Иван Сергеевич

Студент-магистрант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: isfedortsov@gmail.com

А.М. Исаков, С.С. Астрелина, А.И. Мелихов, А.Д. Передвижкин, В.Е. Сковпень

Повышение академической вовлечённости студентов через цифровизацию образовательной среды: фокус на успеваемость

Рассматриваются проблемы низкой академической вовлечённости и успеваемости студентов в высших учебных заведениях. Обосновывается необходимость внедрения цифровых инструментов, интегрированных в образовательный процесс. В качестве ключевого решения предлагается разработка мобильного приложения, реализующего модель смешанного обучения через интерактивное тестирование во время лекционных занятий. Особое внимание уделяется гибкому подходу, позволяющему сохранить доступ к учебным материалам для студентов, отсутствующих по уважительной причине, что способствует соблюдению принципов академической справедливости и непрерывности образовательного процесса.

Ключевые слова: цифровизация образования, академическая вовлечённость, успеваемость, мобильное приложение, смешанное обучение, интерактивное тестирование, образовательная среда.

Современный этап развития высшего образования характеризуется активным поиском путей повышения его качества и эффективности. Одной из наиболее острых проблем остаётся низкий уровень академической вовлечённости студентов, что напрямую коррелирует с показателями успеваемости и посещаемости. Традиционные лекционные форматы зачастую не способны удержать внимание цифрового поколения, привыкшего к интерактивности и мгновенной обратной связи.

Цифровизация образовательной среды представляет собой не просто перенос контента в электронный формат, а фундаментальную трансформацию педагогического взаимодействия. Внедрение smart-технологий в процесс обучения студентов ТУСУРа позволяет создать персонализированную, гибкую и мотивирующую среду для обучения. Данная статья посвящена анализу одного из таких инструментов – мобильного приложения, предназначенного для повышения академической успеваемости через механизмы интерактивного вовлечения во время аудиторной работы.

Теоретические основы проблемы и необходимость цифровой трансформации

Проблема пассивности студентов на лекциях имеет глубокие корни в классической модели образования, где преподаватель является единственным источником знания, а студент – его пассивным реципиентом. Многочисленные исследования в области когнитивной психологии показывают, что концентрация внимания человека значительно снижается после 10–15 мин непрерывного монотонного восприятия информации. Это приводит к тому, что ключевые концепции, объясняемые в середине и конце пары, усваиваются значительно хуже. Существующие системы контроля, такие как устные опросы или выборочные проверочные работы, не решают проблему системно: они охватывают лишь малую часть аудитории и создают атмосферу стресса, а не познавательного интереса.

Цифровизация в данном контексте выступает не как самоцель, а как средство внедрения педагогически обоснованных методик, таких как «смешанное

обучение» (blended learning) и «перевернутый класс» (flipped classroom). Технология становится катализатором педагогического обновления. Она позволяет реализовать принцип «just-in-time teaching» (обучение точно в срок), когда проверка понимания происходит не через неделю на семинаре, а непосредственно в момент объяснения материала, что многократно повышает эффективность усвоения.

Архитектура решения: мобильное приложение как ядро цифровой экосистемы вуза

Предлагаемое мобильное приложение проектируется не как изолированный сервис, а как интеграционный платформенный элемент, тесно связанный с существующей инфраструктурой университета (ИС, электронный деканат, система пропусков).

Сценарное проектирование взаимодействия в аудитории. Процесс начинается с подготовки контента. Преподаватель заранее в личном кабинете на веб-портале создаёт банк коротких (5–7 вопросов) тестов, привязанных к темам учебного курса. Вопросы могут быть различных типов: одиночный и множественный выбор, установление соответствия, краткий конструируемый ответ. Это позволяет проверять не только фактологическое знание, но и понимание причинно-следственных связей.

Непосредственно во время лекции, после объяснения ключевого блока (например, теоремы или классификации), преподаватель со своего планшета или ноутбука запускает соответствующий тест. В этот момент на устройствах студентов, находящихся в геопериметре аудитории (что подтверждается данными с Wi-Fi-роутеров или, как предлагается, интеграцией с турникетами корпуса), активируется push-уведомление и на главном экране приложения появляется крупная, хорошо различимая кнопка с текстом «Присоединиться к опросу».

Принципы проектирования пользовательского интерфейса (UI) и опыта (UX). Успех внедрения напрямую зависит от удобства использования. Интерфейс студента должен быть аскетичным и минималистичным. Экран теста отображает один вопрос за раз, что предотвращает когнитивную перегрузку. Кнопки выбора ответа имеют достаточный размер

для комфортного тапа, а навигация (вперёд/назад) интуитивно понятна. Важным элементом является визуализация таймера, если тест ограничен по времени. Он должен не нервировать студента, а мягко сигнализировать о темпе работы, например, в виде плавно исчезающего кругового индикатора.

Гибкая политика доступа как инструмент академической инклюзии. Критически важным элементом системы является гибкий подход к доступу. Студенты, чьи ID-карты были зафиксированы турникетами при входе в корпус, получают возможность пройти тест мгновенно. Студенты, отсутствующие по уважительной причине (болезнь, официальная спортивная или научная поездка), не лишаются этой возможности. Для них тест появляется в разделе «Отложенные задания» с пометкой «Доступно удалённо» и может быть выполнен в течение 24–48 ч после публикации. Такой подход решает две задачи: стимулирует физическое присутствие, дающее немедленное преимущество, и обеспечивает соблюдение принципа справедливости, предотвращая академическое отставание из-за непредвиденных обстоятельств.

Педагогическая эффективность и аналитическая составляющая

После завершения теста система обеспечивает мгновенную обратную связь. Студент видит свой результат, правильные ответы и, что особенно важно, пояснения к ним. Это не просто констатация факта, а обучающий момент, позволяющий сразу же скорректировать (*misconception*).

Для преподавателя инструмент предоставляет мощный аналитический аппарат. В реальном времени на его экране формируется сводная диаграмма, отображающая процент правильных ответов по каждому вопросу. Если по конкретному вопросу наблюдается массовое затруднение (например, более 60% ошибок), это является прямым сигналом для преподавателя вернуться к данной теме и объяснить её ещё раз, возможно, с другой точки зрения. Таким образом, приложение трансформирует лекцию из монолога в диалог, основанный на данных.

Ожидаемые результаты и ограничения внедрения

Ожидается, что систематическое использование инструмента приведёт к следующим положительным эффектам:

- повышение среднего балла успеваемости по дисциплинам, где применяется система;
- снижение уровня академической задолженности за счёт постоянного контроля и своевременного выявления проблемных зон;
- формирование культуры активного обучения среди студентов;
- рост объективности оценки труда как студентов, так и преподавателей.

Среди потенциальных ограничений можно отметить необходимость обеспечения стабильного интернет-покрытия в аудиториях, а также проведение обучающих семинаров для преподавательского

состава по эффективному использованию нового инструментария в педагогическом дизайне курса.

Заключение

Предложенная концепция мобильного приложения представляет собой конкретный и технологически реализуемый шаг на пути к созданию персонализированной и вовлекающей образовательной среды. Фокус на повышение успеваемости через интерактивные форматы работы непосредственно во время лекции позволяет адресно решить одну из ключевых проблем современного высшего образования. Сочетание элементов геймификации (мгновенные результаты, рейтинги) с глубокой педагогической проработкой сценариев использования и соблюдением принципов академической справедливости делает данную разработку перспективной для апробации и внедрения в учебный процесс современных вузов.

Литература

1. ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 № 273-ФЗ (ред. от 24.03.2021).
2. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – URL: <https://digital.gov.ru/ru/>
3. Андреев А.А. К вопросу об определении понятия «цифровая дидактика» // Открытое образование. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 4–11.
4. Гарсия Э. Обучение в эпоху цифровых технологий: Как технологии меняют процесс обучения. – М.: Бином, 2019. – 278 с.
5. Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура. – М.: ГУ ВШЭ, 2000. – 608 с.
6. Роберт И.В. Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогические и технологические аспекты). – М.: ИИО РАО, 2010. – 356 с.
7. Hwang G.-J. Definition, framework and research issues of smart learning environments – a context-aware ubiquitous learning perspective // Smart Learning Environments. – 2014. – Vol. 1. – № 1.
8. Приказ Минобрнауки России от 11.06.2021 № 474 «Об утверждении Концепции создания и развития цифровой образовательной среды в целях реализации основных профессиональных образовательных программ».

Исаков Александр Михайлович

Ст. преп. каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: Aleksandr.m.isakov@tusur.ru

Астрелина Софья Сергеевна

Студентка фак-та систем управления (ФСУ) ТУСУРа
Эл. почта: astrso@mail.ru

Мелихов Алексей Иванович

Студент ФСУ ТУСУРа
Эл. почта: mardik14312@gmail.com

Передвижкин Александр Дмитриевич

Студент ФСУ ТУСУРа
Эл. почта: peredvizhkin05@mail.ru

Сковпень Виктория Евгеньевна

Студент ФСУ ТУСУРа
Эл. почта: skovpen.vika05@gmail.com

Д.В. Гуцол, Г.Р. Полтавец, Д.О. Ковалевский, А.В. Дегтярев

Частотное управление беспроводного LCC-преобразователя для зарядки беспилотных аппаратов с использованием имитационного моделирования

Проведены исследования метода частотного управления беспроводным LCC-преобразователем для зарядки беспилотных аппаратов. Рассматривается эффективность использования LCC-конфигурации для беспроводной передачи электроэнергии, а также различные методы управления преобразователями, включая частотный метод. Приводятся результаты имитационного моделирования в среде MatLab/Simulink, которые упрощают расчёт и настройку преобразователей для зарядки беспилотных аппаратов.

Ключевые слова: резонансный преобразователь, LCC-преобразователь, резонанс, математическая модель, входной импеданс, беспроводная передача электроэнергии.

Современные беспилотные аппараты сталкиваются с ключевым ограничением – необходимостью частой подзарядки аккумуляторов, что снижает их автономность и эффективность применения. Решением этой проблемы являются системы беспроводной зарядки. Среди наиболее распространённых топологий – LC, LLC и LCC, каждая из которых обладает уникальными характеристиками, определяющими их эффективность, стабильность и сложность управления [1].

LC-резонансные преобразователи представляют собой базовую конфигурацию, состоящую из последовательно соединённых индуктивности и ёмкости. Их ключевое преимущество – простота реализации и низкая стоимость компонентов. Однако LC-схемы чувствительны к изменению нагрузки и взаимного положения катушек, что приводит к нестабильности выходного напряжения и снижению КПД при отклонении от резонансной частоты. Такие системы чаще применяются в маломощных приложениях, где не требуется высокая точность регулирования [2].

Более сложная LLC-топология включает дополнительную индуктивность, что позволяет улучшить адаптацию к изменяющемуся коэффициенту связи между катушками. LLC-преобразователи демонстрируют высокий КПД (до 92–95%) благодаря мягкой коммутации (ZVS/ZCS) и способности работать в широком диапазоне нагрузок. Однако их проектирование требует точного расчёта резонансных параметров, а управление усложняется при динамически изменяющихся условиях, например, при зарядке подвижных объектов.

Наиболее универсальной считается LCC-конфигурация, где введение параллельного конденсатора обеспечивает стабильность выходного напряжения независимо от изменений нагрузки. LCC-преобразователи сочетают преимущества LC и LLC, демонстрируя высокий КПД (85–93%) и устойчивость к вариациям взаимной индуктивности. Они особенно эффективны в системах с переменным зазором между катушками, таких как зарядка беспилотников или электромобилей. Однако сложность расчёта параметров и необходимость точного управления частотой или фазой увеличивают требования к контроллерам [3].

Беспроводные LCC-резонансные преобразователи требуют точного управления для обеспечения высокой эффективности передачи энергии, стабильности выходного напряжения и адаптации к изменяющимся условиям (расстояние между катушками, нагрузка, внешние помехи). Основные методы управления, их преимущества и недостатки приведены в табл. 1 [4, 5].

Помимо способов, перечисленных в табл. 1 имеются и гибридные способы, которые заключаются в комбинации. Например, комбинация частотного и фазового оптимально для систем с изменяющимся зазором, а амплитудный и адаптивный применяется для точного поддержания мощности.

В зарядке дронов применяют:

1. Частотное управление для грубой настройки резонанса.
2. Фазовое управление для точной регулировки мощности.

Исследован метод частотного управления беспроводным LCC-преобразователем, адаптированный для зарядки беспилотных аппаратов. Предлагаемый подход основан на имитационном моделировании в среде MatLab/Simulink.

Принципиальная схема LCC-преобразователя изображена на рис. 1.

В [6] приведена математическая модель LCC-преобразователя в первом приближении (с заменой модифицированного синуса на реальный) и основанный на законах Кирхгофа. Для оценки работы преобразователя воспользуемся имитационным пакетом MatLab/Simulink. Модель LCC-преобразователя приведена на рис. 2. Параметры моделирования можно увидеть в табл. 2.

Зависимость входной и выходной мощности от частоты приведена на рис. 3. На рис. 4 приведены зависимость выходного напряжения от частоты.

Как можно видеть из рис. 3 и 4, у беспроводного LCC-преобразователя имеется 2 пика – при 30 и при 73 кГц, что соответствует выходным значениям мощности 270 и 182 Вт соответственно. Напряжение в этих точках равно 47 и 38 В соответственно. Первый пик мощности имеет более крутые склоны чем второй. Управление частотой на этих пиках может носить лишь узкий характер из-за необходимости точного позиционирования частоты.

Таблица 2

**Параметры моделирования беспроводного
LCC-преобразователя**

Параметр	Обозначение	Величина
Входное напряжение	E	36 В
Сопротивление транзистора	R_{On}	0,1 Ом
Внутреннее сопротивление диода	R_d	0,01 Ом
Сопротивление снаббера	R_{sn}	10 кОм
Сопротивление последовательной индуктивности	R_l	10 мкОм
Последовательная индуктивность	L_l	150 мкГн
Последовательная ёмкость	C_l	100 нФ
Параллельная ёмкость	C_2	100 нФ
Индуктивность передающей катушки	L_p	100 мкГн
Сопротивление передающей катушки	R_p	5 мОм
Индуктивность принимающей катушки	L_s	64,6 мкГн
Сопротивление принимающей катушки	R_s	5 мОм
Взаимная индуктивность	L_m	33,5 мкГн
Сопротивление нагрузки	R_{load}	10 Ом

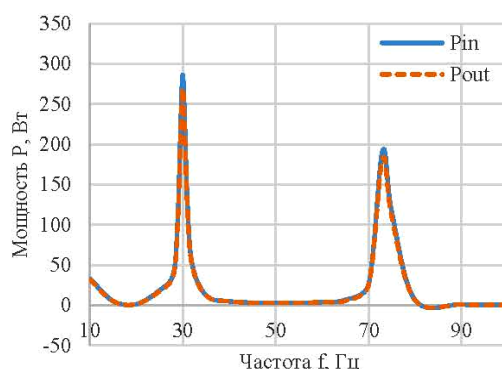


Рис. 3. Входная и выходная мощность беспроводного LCC-преобразователя от частоты

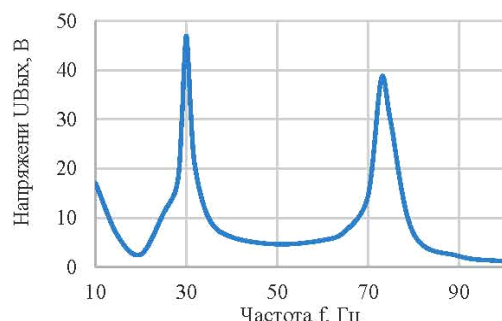


Рис. 4. Выходное напряжение беспроводного LCC-преобразователя от частоты

Выводы

Рассмотрена имитационная модель беспроводного LCC-преобразователя с частотным управлением. Приведены его характеристики, представлены результаты моделирования. Имитационное моделирование в среде MatLab/Simulink позволяет упростить расчёт и настройку LCC-преобразователей для зарядки беспилотных аппаратов. Результаты моде-

лирования демонстрируют зависимость входной и выходной мощности, а также выходного напряжения от частоты, что помогает оптимизировать работу преобразователя. В имитационной модели удалось достичь высокого КПД (около 94%) благодаря низким потерям на активных элементах. Однако в реальных образцах потери могут быть выше. Управление частотой на резонансных пиках требует точного позиционирования частоты.

Литература

- Осипов А.В. Сопоставление энергетических характеристик резонансных LLC- и LCC-преобразователей постоянного напряжения // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 153–159.
- Медведева Т.С. Применение беспроводного симметричного LLC преобразователя для обмена электроэнергией между беспилотными аппаратами / Т.С. Медведева, А.С. Кустов, Б.А. Авдеев // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2024. – № 7. – С. 183.
- Application of Improved Linear Active Disturbance Rejection Control in LLC-Converters for Battery Formation / G. Zhang, X. Zhang, C. Fu, B. Qi // 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS). – 2023. – P. 680–684.
- GaN Based LCC-Converter for Lithium-Ion Battery Chargers / R.A. Attanasio, H. Ademane, J. Hyslop, G. Vitale // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2023. – P. 2489–2495.
- Белов Г.А., Анализ резонансного преобразователя типа LCC в режиме непрерывного тока LC-контура / Г.А. Белов, Г.В. Малинин, Н.П. Митяшин // Электротехника. – 2024. – № 8. – С. 22–30.
- Ковалевский Д.О., Модель беспроводного LCC-преобразователя для зарядки беспилотных аппаратов / Д.О. Ковалевский, Т.С. Медведева // Современные проблемы теории машин. – 2025. – №19. – С. 103–106.
- Бушуева А.С. Экспериментальное исследование магнитосвязанных катушек для беспроводного устройства передачи электроэнергии / А.С. Бушуева, Б.А. Авдеев // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): сборник статей XII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза. – 2025. – С. 27–30.

Гуцол Дмитрий Васильевич

Нач. отд. информатизации
Херсонского технического университета (ХТУ)
Эл. почта: kherson_tu@mail.ru

Полтавец Глеб Романович

Исследователь молодежной научной лаб. ХТУ
Эл. почта: khtunauka@yandex.ru

Ковалевский Дмитрий Олегович

Исследователь молодежной научной лаб. ХТУ
Эл. почта: kovalevskiidm@gmail.com

Дегтярев Андрей Владимирович

Исследователь молодежной научной лаб. ХТУ
Эл. почта: captainandreydegtyarev@gmail.com

Ю.А. Самойлов, А.А. Погодин, А. Д. Кузовлев

Исследование речевых параметров в зависимости от возраста говорящего

Рассматривается задача распознавания речи в зависимости от возраста людей. Рассмотрены современные исследования в данной области. Подробно описаны параметры речи и их особенности в разных возрастных периодах.

Ключевые слова: возраст, параметры, обработка речи.

Исследование речевых параметров в зависимости от возраста говорящего показывает, что возрастные изменения оказывают значительное влияние на акустические и артикуляционные характеристики речи. С возрастом изменяются частота основного тона, интенсивность, длительность гласных и время начала голосового возбуждения, что влияет на разборчивость и выразительность речи. Эти изменения важны для разработки адаптивных систем автоматического распознавания речи и голосовой диагностики. Целью данной работы является исследование изменения речевых параметров человека в процессе взросления.

Исследования

Данную тему изучают многие ученые, наша группа изучила некоторые работы:

В [1] авторы исследуют, как изменяются временные параметры речи (например, длительность звуков и пауз) в зависимости от возраста говорящего и стиля речи. Рассматриваются различия между спонтанной и подготовленной речью, а также влияние возрастных изменений на скорость и ритмическую структуру речи. Полученные результаты важны для разработки технологий автоматического распознавания речи и анализа речи в лингвистических и медицинских исследованиях.

В работе [2] анализируются изменения акустических характеристик речи взрослых людей с возрастом, включая частотные, временные и артикуляционные параметры. Авторы используют многомерные статистические методы для выявления закономерностей возрастных изменений речи. Результаты могут быть полезны для улучшения речевых интерфейсов, диагностики возрастных изменений голосового аппарата и разработки систем распознавания речи, адаптированных к разным возрастным группам.

В статье [3] рассматриваются возрастные изменения характеристик голосового источника, такие как фундаментальная частота, интенсивность и тембральные особенности голоса. Авторы анализируют, как физиологические изменения голосового аппарата с возрастом влияют на акустические параметры речи. Эти исследования могут быть использованы в фониатрии, голосовой биометрии и автоматическом анализе речи.

В статье [4] изучается, как изменяется параметр VOT (Voice Onset Time – время начала голосового возбуждения) с возрастом. Этот параметр важен для

характеристики звонких и глухих согласных звуков. Исследование показывает, что возрастные изменения голосового аппарата могут влиять на артикуляцию и разборчивость речи. Результаты работы могут быть полезны для улучшения речевых технологий, в том числе автоматического распознавания речи и голосовой диагностики.

Рассмотренные исследования подтверждают актуальность данной работы, к сожалению, нет численных значений изменений параметров речи с изменением возраста человека.

Параметры

На основе научных статей, рассмотрены ключевые речевые параметры и выделены их особенности в сравнении с обычной речью.

1. Частота основного тона. У детей голос высокий (примерно 250–300 Гц). У взрослых мужчин голос ниже (~100 Гц), у женщин выше (~200 Гц). У пожилых людей у мужчин может немного повышаться, а у женщин – снижаться.

2. Формантные частоты. Форманты – это характерные частоты звуков речи, которые создают тембр голоса. Они зависят от размера голосового тракта (рта, гортани и носоглотки). У детей голосовой тракт короче, поэтому их формантные частоты выше. С возрастом форманты снижаются, так как увеличивается размер голосового тракта.

3. Темп речи. Это скорость, с которой человек говорит. Измеряется в слогах или словах в секунду. Дети говорят медленнее, потому что у них меньше опыта в артикуляции. Взрослые говорят быстрее и увереннее. У пожилых людей темп снова замедляется из-за возрастных изменений в моторике.

4. Длительность гласных. Это сколько времени занимает произнесение гласных звуков. У детей и пожилых людей гласные обычно длиннее (они растягивают слова). Взрослые чаще говорят четче и быстрее.

5. Интенсивность. Это насколько громко говорит человек. Дети могут говорить тише, но иногда резко повышать громкость. Взрослые контролируют громкость лучше. У пожилых людей голос может становиться слабее из-за ухудшения мышечного контроля и дыхательной поддержки.

6. Вариативность мелодики. Просодия – это интонация, то, как голос «скачет» вверх и вниз. Дети часто говорят более эмоционально, с резкими изменениями интонации. Взрослые регулируют интона-

цию в зависимости от ситуации. У пожилых людей голос может становиться более монотонным.

7. Шумовые характеристики. Эти параметры описывают стабильность голоса. Jitter – измеряет неровность частоты (если голос «дрожит», это Jitter). Shimmer – измеряет колебания громкости (если громкость скачет, это Shimmer). У детей и молодых людей голос более стабильный. У пожилых людей голосовые связки ослабевают, и эти показатели увеличиваются.

8. Время начала голосового возбуждения (VOT). Это промежуток времени между моментом размыкания артикуляционного органа (например, губ или языка) и началом голосовой вибрации. У детей VOT может быть менее стабильным из-за недостаточного контроля над артикуляцией. У взрослых он более чёткий и устойчивый. С возрастом у пожилых людей VOT может увеличиваться, что приводит к замедлению произношения звонких согласных и снижению чёткости речи.

Значения выше перечисленных-параметров будут рассмотрены в экспериментальных исследованиях в будущем.

Наборы данных

При поиске записей речи людей разного возраста в открытых источниках найден лишь один набор аудиофайлов, который включает в себя записи голосов разных людей на английском языке. В рамках данной темы найденный набор данных не подходит, так как влияние возраста на изменение значений параметров речевых сигналов целесообразнее изучать на записях голоса одного человека по мере его взросления. Поэтому было принято решение создать речевой корпус с помощью видеохостингов.

Заключение

Исходя из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что данная проблема не является

новой и до сих пор актуальна. Исследования ведутся и в настоящее время, новизна в данной работы заключается в рассмотрении изменений значений параметров с учетом изменения возраста одного диктора. Для дальнейших исследований необходимо составить корпус и зафиксировать изменения речевых параметров.

Литература

1. Bóna Judit. Temporal characteristics of speech: The effect of age and speech style // J. Acoust. Soc. Am. – 2014. – Vol. 136, No. 2. – P. EL116–EL121.
2. Fougeron C. Multi-dimensional variation in adult speech as a function of age / C. Fougeron, F. Guitard-Ivent, V. Delvaux // Languages. – 2021. – Vol. 6, No. 4. – P. 1–25.
3. Собакин А.Н. Изменение характеристик голосового источника от возраста говорящего / А.Н. Собакин, А.В. Маслов // Ученые записки национального общества прикладной лингвистики. – 2018. – Т. 2, вып. 22. – С. 39–48.
4. Xuanda C. The Trajectory of Voice Onset Time with Vocal Aging / C. Xuanda, X. Ziyu, H. Jian // Interspeech. – 2018. – P. 1556–1560.

Самойлов Юрий Алексеевич

Студент каф. комплексной информационной безопасности (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники(ТУСУР)
Эл. почта: eewqz@mail.ru

Погодин Александр Алексеевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: gergepso@gmail.com

Кузовлев Артем Дмитриевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: arti26102005@gmail.com

В.Е. Заборонок, Е.А. Поломошнова, Р.С. Кульшин

Применение неинвазивных нейроинтерфейсов для выявления лжи

Анализ активности мозга с целью выявления лжи представляет собой важное направление в области нейротехнологий. С развитием неинвазивных методов регистрации мозговой активности, таких как электроэнцефалография (ЭЭГ) и нейроинтерфейсы, становится возможным создание компактных и точных систем определения достоверности ответов. Такие технологии могут найти применение в судебной практике, безопасности, психологии и других сферах, где важно отделить правду от обмана.

Ключевые слова: ЭЭГ, нейроинтерфейс, выявление лжи.

Нейрокомпьютерный интерфейс представляет собой устройство, способное считывать электрическую активность мозга и преобразовывать её в сигналы, понятные компьютеру. В настоящее время использование электроэнцефалографии для выявления лжи сопровождается некоторыми трудностями, которые связаны с развёртываемостью аппаратуры, а также с невозможностью провести достаточное количество исследований. Нейроинтерфейс обладает достаточной мобильностью, подготовка к его использованию занимает меньше пятнадцати минут. В контексте детекции лжи такой интерфейс может служить миниатюрной версией ЭЭГ-аппарата, позволяя регистрировать потенциал P300-MERMER [1], который, например, используется в экспериментах, где участник должен распознавать цвет объекта.

Принцип действия такого детектора лжи аналогичен описанному выше. Перед началом теста испытуемому предлагается провести время в определённом помещении и запомнить как можно больше деталей. Позднее он проходит проверку на устройстве, основанном на нейроинтерфейсе. Анализ записанных данных осуществляется с помощью математических моделей или нейросетей, способных выявлять моменты появления сигнала P300-MERMER. Параллельно также фиксируется пульс испытуемого.

Практические примеры и перспективы использования нейроинтерфейсов в детекции лжи

На данный момент данные, собранные с помощью полиграфа, ЭЭГ и фМРТ [2], не признаются в большинстве судебных систем в качестве доказательств. Однако существуют успешные случаи применения этих технологий. Например, в Индии в 2008 г. некая женщина по имени А. Шарма была приговорена к пожизненному заключению за отравление бывшего жениха. При расследовании использовалась разработка индийских учёных – метод BEOS (Brain Electrical Oscillations Signature), схожий с ЭЭГ. В Великобритании традиционный полиграф применяется при досрочном освобождении лиц, осуждённых за сексуальные преступления. Также полиграф иногда используется компаниями при найме сотрудников, но только с согласия кандидата.

Создание детектора лжи на основе неинвазивного нейроинтерфейса выглядит перспективным, поскольку такие устройства компактны и не требуют

сложной подготовки испытуемого. Однако точность исследования лжи даже на полноразмерном аппарате ЭЭГ не является абсолютной, поэтому о допустимой достоверности портативных решений говорить пока преждевременно.

Исследуемые метрики

Для исследования активности мозга во время считывания правды или лжи исследовательская группа рассмотрела различные показатели, снятые с помощью нейроинтерфейса, такие как:

- ритмы волновой активности мозга: альфа-, бета-, тета- и дельта-ритмы. Они позволяют определить конкретные состояния, в которых может находиться испытуемый, такие как усталость, злость, раздражённость, радость и так далее;

- интенсивность электромагнитной активности мозга: данный показатель может охарактеризовать нагрузку, которой подвергается мозг испытуемого во время выдачи той или иной информации, а также от внешних раздражителей;

- показатель P300-MERMER: метрика, показывающая реакцию мозга испытуемого на распознавание какого-либо образа или информации, уже находящейся в его памяти. По данной реакции мозга можно узнать, например, видел ли раньше испытуемый, показанный ему предмет, либо слышал ли он голос с предоставленной ему записи.

Для записи показаний было использовано приложение, написанное на основе Capsule API, программного интерфейса, который поставляется вместе с нейроинтерфейсом. С помощью него были считаны сырые данные ЭЭГ.

Проверка релевантности данных

В ходе исследования были собраны три категории данных:

- ложные ответы – участники сознательно давали неверные ответы на заданные вопросы;

- правдивые ответы – участники отвечали честно и точно;

- тестовые данные (произвольные ответы) – участники выбирали способ ответа самостоятельно, без указаний говорить только правду или лгать.

В эксперименте приняли участие 15 испытуемых, каждый из них проходил три тестирования, так же были созданы условия, которые бы позволяли испытуемым не отвлекаться и сосредоточиться толь-

ко на ответах. В каждом тестировании участника просили предоставлять сначала честные ответы, затем ложные и после произвольные ответы соответственно. После собранные данные были отфильтрованы и промаркированы для дальнейшего анализа.

Такая структура позволила сравнить нейронные паттерны, возникающие при различных типах ответов, а также протестировать эффективность алгоритма в условиях неопределённости.

Статистический анализ

Первым шагом для подтверждения научных и медицинских фактов и теорий стало использование однофакторного дисперсионного анализа для выяв-

ления зависимостей между показаниями ритмов и правдивости ответов испытуемого. Использовался однофакторный дисперсионный анализ [4] (ANOVA) в Excel для проверки статистической значимости различий между группами. Рассчитывались средние значения, дисперсия, F-критерий и p-value.

Была выдвинута следующая гипотеза: ложь влияет на показатели, фиксируемый нейроинтерфейсом, в частности, на биоритмы организма. Для каждого из ритмов был проведен отдельный анализ, были взяты данные, снятые с одного из испытуемых. Результаты показателей альфа-ритма, бета-ритмов – тета-ритмов даны на рис. 1.

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	10	2,779559	0,2779559	0,00064204		
Строка 2	10	2,402591	0,2402591	0,0010839		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,007105	1	0,0071052	8,23349812	0,01019662	4,413873419
Внутри групп	0,015533	18	0,000863			
Итого	0,022639	19				

a

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	10	4,985764	0,498576	0,0005107		
Строка 2	10	5,372904	0,53729	0,00287818		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,007493891	1	0,007494	4,42263209	0,049796264	4,413873419
Внутри групп	0,030499948	18	0,001694			
Итого	0,037993839	19				

б

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	10	1,096058	0,109606	0,000578		
Строка 2	10	1,156305	0,115631	0,000428		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,000181	1	0,000181	0,360773	0,555565519	4,413873419
Внутри групп	0,009055	18	0,000503			
Итого	0,009236	19				

в

Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа ритмов: *a* – альфа; *б* – бета; *в* – тета

На основании результатов дисперсионного анализа можно сделать вывод: различие между правдивостью ответа оказывает существенное влияние на показатели альфа-ритма и бета-ритма, при этом не оказывает влияния на тета-ритм.

Результаты анализов можно интерпретировать следующим образом:

– Так как альфа-ритм отражает состояние ослабленного бодрствования [3], а его низкие показатели связаны с когнитивной нагрузкой, эмоциональным напряжением и концентрацией внимания, результат анализа подтверждает его роль в детекции лжи: чем ниже показатели, тем с большей вероятностью человек говорит ложь.

В.Е. Заборонок, Е.А. Поломошнова, Р.С. Кульшин

Применение неинвазивных нейроинтерфейсов для выявления лжи

Анализ активности мозга с целью выявления лжи представляет собой важное направление в области нейротехнологий. С развитием неинвазивных методов регистрации мозговой активности, таких как электроэнцефалография (ЭЭГ) и нейроинтерфейсы, становится возможным создание компактных и точных систем определения достоверности ответов. Такие технологии могут найти применение в судебной практике, безопасности, психологии и других сферах, где важно отделить правду от обмана.

Ключевые слова: ЭЭГ, нейроинтерфейс, выявление лжи.

Нейрокомпьютерный интерфейс представляет собой устройство, способное считывать электрическую активность мозга и преобразовывать её в сигналы, понятные компьютеру. В настоящее время использование электроэнцефалографии для выявления лжи сопровождается некоторыми трудностями, которые связаны с развёртываемостью аппаратуры, а также с невозможностью провести достаточное количество исследований. Нейроинтерфейс обладает достаточной мобильностью, подготовка к его использованию занимает меньше пятнадцати минут. В контексте детекции лжи такой интерфейс может служить миниатюрной версией ЭЭГ-аппарата, позволяя регистрировать потенциал P300-MERMER [1], который, например, используется в экспериментах, где участник должен распознавать цвет объекта.

Принцип действия такого детектора лжи аналогичен описанному выше. Перед началом теста испытуемому предлагается провести время в определённом помещении и запомнить как можно больше деталей. Позднее он проходит проверку на устройстве, основанном на нейроинтерфейсе. Анализ записанных данных осуществляется с помощью математических моделей или нейросетей, способных выявлять моменты появления сигнала P300-MERMER. Параллельно также фиксируется пульс испытуемого.

Практические примеры и перспективы использования нейроинтерфейсов в детекции лжи

На данный момент данные, собранные с помощью полиграфа, ЭЭГ и фМРТ [2], не признаются в большинстве судебных систем в качестве доказательств. Однако существуют успешные случаи применения этих технологий. Например, в Индии в 2008 г. некая женщина по имени А. Шарма была приговорена к пожизненному заключению за отравление бывшего жениха. При расследовании использовалась разработка индийских учёных – метод BEOS (Brain Electrical Oscillations Signature), схожий с ЭЭГ. В Великобритании традиционный полиграф применяется при досрочном освобождении лиц, осуждённых за сексуальные преступления. Также полиграф иногда используется компаниями при найме сотрудников, но только с согласия кандидата.

Создание детектора лжи на основе неинвазивного нейроинтерфейса выглядит перспективным, поскольку такие устройства компактны и не требуют

сложной подготовки испытуемого. Однако точность исследования лжи даже на полноразмерном аппарате ЭЭГ не является абсолютной, поэтому о допустимой достоверности портативных решений говорить пока преждевременно.

Исследуемые метрики

Для исследования активности мозга во время считывания правды или лжи исследовательская группа рассмотрела различные показатели, снятые с помощью нейроинтерфейса, такие как:

- ритмы волновой активности мозга: альфа-, бета-, тета- и дельта-ритмы. Они позволяют определить конкретные состояния, в которых может находиться испытуемый, такие как усталость, злость, раздражённость, радость и т.д.;

- интенсивность электромагнитной активности мозга: данный показатель может охарактеризовать нагрузку, которой подвергается мозг испытуемого во время выдачи той или иной информации, а также от внешних раздражителей;

- показатель P300-MERMER: метрика, показывающая реакцию мозга испытуемого на распознавание какого-либо образа или информации, уже находящейся в его памяти. По данной реакции мозга можно узнать, например, видел ли раньше испытуемый показанный ему предмет либо слышал ли он голос с предоставленной ему записи.

Для записи показаний было использовано приложение, написанное на основе Capsule API программного интерфейса, который поставляется вместе с нейроинтерфейсом. С помощью него были считаны сырые данные ЭЭГ.

Проверка релевантности данных

В ходе исследования были собраны три категории данных:

- ложные ответы – участники сознательно давали неверные ответы на заданные вопросы;

- правдивые ответы – участники отвечали честно и точно;

- тестовые данные (произвольные ответы) – участники выбирали способ ответа самостоятельно, без указаний говорить только правду или лгать.

В эксперименте приняли участие 15 испытуемых, каждый из них проходил три тестирования, также были созданы условия, которые бы позволяли испытуемым не отвлекаться и сосредоточиться толь-

ко на ответах. В каждом тестировании участника просили предоставлять сначала честные ответы, затем ложные и после произвольные ответы соответственно. После собранные данные были отфильтрованы и промаркированы для дальнейшего анализа.

Такая структура позволила сравнить нейронные паттерны, возникающие при различных типах ответов, а также протестировать эффективность алгоритма в условиях неопределённости.

Статистический анализ

Первым шагом для подтверждения научных и медицинских фактов и теорий стало использование однофакторного дисперсионного анализа для выяв-

ления зависимостей между показаниями ритмов и правдивости ответов испытуемого. Использовался однофакторный дисперсионный анализ [4] (ANOVA) в Excel для проверки статистической значимости различий между группами. Рассчитывались средние значения, дисперсия, F-критерий и p-value.

Была выдвинута следующая гипотеза: ложь влияет на показатели, фиксируемые нейроинтерфейсом, в частности, на биоритмы организма. Для каждого из ритмов был проведен отдельный анализ, были взяты данные, снятые с одного из испытуемых. Результаты показателей альфа-ритма, бета-ритма – тета-ритма даны на рис. 1.

Однофакторный дисперсионный анализ							
ИТОГИ							
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия			
Строка 1	10	2,779559	0,2779559	0,00064204			
Строка 2	10	2,402591	0,2402591	0,0010839			
Дисперсионный анализ							
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое	
Между группами	0,007105	1	0,0071052	8,23349812	0,01019662	4,413873419	
Внутри групп	0,015533	18	0,000863				
Итого	0,022639	19					

а

Однофакторный дисперсионный анализ							
ИТОГИ							
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия			
Строка 1	10	4,985764	0,498576	0,0005107			
Строка 2	10	5,372904	0,53729	0,00287818			
Дисперсионный анализ							
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое	
Между группами	0,007493891	1	0,007494	4,42263209	0,049796264	4,413873419	
Внутри групп	0,030499948	18	0,001694				
Итого	0,037993839	19					

б

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	10	1,096058	0,109606	0,000578		
Строка 2	10	1,156305	0,115631	0,000428		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,000181	1	0,000181	0,360773	0,555565519	4,413873419
Внутри групп	0,009055	18	0,000503			
Итого	0,009236	19				

в

Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа ритмов: а – альфа; б – бета; в – тета

На основании результатов дисперсионного анализа можно сделать вывод: различие между правдивостью ответа оказывает существенное влияние на показатели альфа-ритма и бета-ритма, при этом не оказывает влияния на тета-ритм.

Результаты анализов можно интерпретировать следующим образом:

– Так как альфа-ритм отражает состояние расслабленного бодрствования [3], а его низкие показатели связаны с когнитивной нагрузкой, эмоциональным напряжением и концентрацией внимания, результат анализа подтверждает его роль в детекции лжи: чем ниже показатели, тем с большей вероятностью человек говорит ложь.

– Повышение бета-ритма ассоциировано с активным мышлением и тревожностью. Следовательно, результат анализа подтверждает факт того, что имеется тенденция повышения показателей бета-ритма при лжи.

– Изменение показателей тета-ритма менее предсказуемо в связи с зависимостью от индивидуальных различий темперамента испытуемых, их объемом памяти. Нельзя наблюдать какую-либо выраженную тенденцию изменения данных.

Проведение данных вычислений подтолкнуло к более глубокому анализу данных: было принято решение использовать технологии машинного обучения и применять такие методы исследования, как корреляционный, кластерный, однофакторный и двухфакторный дисперсионные анализы.

Выводы

Использование неинвазивных нейроинтерфейсов действительно имеет потенциал для развития в области детекции лжи через анализ мозговой активности. Наиболее перспективными метриками для выявления лжи оказались альфа-ритм и бета-ритм мозговой активности. Полученные данные могут служить основой для создания более совершенных систем распознавания лжи. Однако стоит отметить, для практического применения необходимы дополнительные исследования и улучшение точности распознавания.

Литература

1. Farwell L.A. Brain fingerprinting: a comprehensive tutorial review of detection of concealed information with event-related brain potentials // *Cognitive Neurodynamics*. – 2012. – Vol. 6, Iss. 2. – P. 115–154.
2. Rosenfeld J.P., Hu X., Labkovsky E. et al. Review of Recent Studies and Issues Regarding the P300-Based Complex Trial Protocol for Detection of Concealed Information // *International Journal of Psychophysiology*. – 2013. – Vol. 90, Iss. 2. – P. 118–134.
3. Альфа-ритм – CMI Brain Research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cmi.to/%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC%D1%8B-%D1%8D%D1%8D%D0%B3/%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC%D1%8B/>, свободный (дата обращения: 13.09.2025).
4. Rosman S.V. Integral indicators of the variance of the amplitude-frequency characteristics of the alpha rhythm of the EEG in the diagnosis of mental diseases // *Mental health*. – 2014. – No. 1. – P. 132–135.
5. Rosman S.V. On the issue of objective diagnosis of dissociative identity disorder in the practice of forensic psychiatry // *Medical alphabet*. – 2023. – Vol. 1 (7). – P. 17–21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2023-7-17-21>, свободный (дата обращения: 10.09.2025).

Заборонок Вадим Евгеньевич

Студент каф. автоматизации и обработки информации (АОИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: vladim.zaboronok93@mail.ru

Поломошнова Елизавета Александровна

Студентка каф. АОИ ТУСУРа
Эл. почта: pollen.way@gmail.com

Кульшин Роман Сергеевич

Ст. преп., аспирант каф. АОИ ТУСУРа
Эл. почта: roman.s.kulshin@tusur.ru

Е.А. Прец

Логическая модель серверного приложения интеграции информационных потоков данных в среде Apache Solr

Представлена логическая модель серверного CLI-приложения для интеграции информационных потоков в Apache Solr. Решение описывает процессы унифицированной загрузки данных из различных источников и формирует основу для дальнейшей разработки архитектуры и реализации системы.

Ключевые слова: Apache Solr, логическая модель обработки данных, интеграция информационных потоков, потоковая индексация, SolrJ, унификация источников данных.

Современные предприятия и организации функционируют в условиях постоянного роста объёмов информации. Ежедневно формируются и обрабатываются массивы данных, поступающих из различных источников: CRM- и ERP-систем, систем документооборота, журналов серверных событий, реляционных баз данных и облачных сервисов. Эти данные могут различаться по структуре и формату представления (CSV, JSON, XML), частоте обновления и степени структурированности. Такое разнообразие осложняет их дальнейшее использование в аналитических и поисковых системах.

Для эффективного применения информации необходимо обеспечить её преобразование к унифицированному виду и загрузку в централизованную систему поиска и анализа. Одним из наиболее востребованных решений является Apache Solr – поисковая платформа с открытым исходным кодом, основанная на библиотеке Lucene. Система поддерживает полнотекстовый поиск, фасетную навигацию, масштабирование и используется в различных сферах: от интернет-магазинов и банковских приложений, до государственных сервисов и архивных информационных систем [1][2].

В ранних версиях Solr, интеграция данных обеспечивалась встроенным модулем Data Import Handler (DIH), который позволял подключать внешние источники (реляционные базы данных, XML- и CSV-файлы) и автоматически преобразовывать информацию в индексируемый формат. Однако начиная с версии 9.0 данный модуль был исключён из состава системы по причинам, связанным с безопасностью и сложностью сопровождения. Это вызвало разрыв в функциональности и создало проблему для пользователей, которые были вынуждены разрабатывать собственные инструменты для загрузки данных [3].

Таким образом, актуальной задачей становится создание внешнего серверного приложения, которое возьмёт на себя функции по извлечению информации из различных источников, её валидации, трансформации и последующей загрузке в Solr. На первом этапе исследования особое значение имеет построение логической модели обработки данных. Эта модель должна описывать последовательность операций, выделить ключевые процессы и задать основу

для проектирования архитектуры и практической реализации системы.

Логическая модель серверного приложения для интеграции данных в Apache Solr представляет собой концептуальное описание последовательности шагов по обработке информации. Её назначение – определить общую структуру процессов, выявить точки преобразования данных и взаимодействие модулей будущего приложения. Такая модель служит «каркасом», на котором в дальнейшем строится архитектура и программная реализация.

На вход системы могут поступать данные из трёх основных типов источников:

- CSV-файлы – традиционный формат табличных данных, используемый для экспорта отчётов и выгрузок из корпоративных систем, легко генерируется большинством бизнес-приложений, однако требует строгой проверки типов и структуры;

- JSON-документы – формат, широко применяемый в веб-приложениях и API для представления структурированной и иерархической информации, позволяет хранить вложенные объекты, что удобно для сложных корпоративных данных;

- SQL-запросы – интерфейс доступа к данным реляционных баз, позволяющий извлекать как агрегированные наборы записей, так и результаты аналитических запросов, поддержка SQL обеспечивает совместимость с большинством промышленных СУБД.

Для каждого источника в логической модели предусмотрен специализированный блок обработки.

На первом этапе выполняется чтение входных данных и их преобразование во внутреннее представление.

Важно отметить, что именно на этом уровне решается задача унификации входных потоков: независимо от исходного формата данные приводятся к единой структуре.

Далее осуществляется валидация, которая включает проверку синтаксиса, корректности типов данных и наличие обязательных атрибутов.

Этот шаг необходим для предотвращения ситуаций, когда некорректные записи могут привести к сбоям при индексации или искажению содержимого поискового индекса. Валидация позволяет заранее выявить проблемы и минимизировать затраты на их исправление.

Следующим этапом является трансформация данных с помощью модуля FieldMapper.

На этом уровне выполняется сопоставление полей источника со структурой коллекции Solr, что позволяет привести разнородные данные к единому формату хранения.

В рамках трансформации возможны:

- переименование атрибутов для приведения к единой схеме;
- преобразование типов (например, строковых значений дат в формат временной метки);
- фильтрация ненужных полей и значений;
- формирование составных полей (например, объединение имени и фамилии в единое поле «ФИО»).

Подобные операции необходимы, так как источники данных часто используют различные соглашения о наименованиях и форматах представления информации. FieldMapper позволяет описывать правила преобразования в конфигурационных файлах без изменения исходного кода, что облегчает сопровождение системы и её адаптацию к новым источникам. Таким образом достигается унификация данных и их полная согласованность со схемой Solr, что является ключевым условием успешной индексации.

После трансформации, информация преобразуется в объекты SolrInputDocument, представляющие собой структуру, готовую для индексации в Solr. На этом этапе данные группируются в батчи (пакеты), что позволяет повысить эффективность передачи и снизить нагрузку на сеть.

Использование пакетной обработки особенно важно при интеграции больших массивов информации – это повышает скорость индексации и снижает вероятность перегрузки системы.

Обработка ошибок также выделена в отдельный процесс. Некорректные записи исключаются из батча, при этом общий процесс загрузки продолжается, что обеспечивает устойчивость системы к непредвиденным сбоям.

На заключительном шаге подготовленные батчи передаются в клиентскую обёртку SolrUploadClient, которая взаимодействует с REST API Solr. Здесь выполняется загрузка данных в коллекцию и подтверждение успешной индексации. Встроенное логирование фиксирует прохождение каждой операции, регистрирует ошибки и позволяет проводить последующий анализ [4].

Общая последовательность шагов логической модели представлена на рис. 1.

Схема отражает ключевые этапы работы системы. На вход поступают данные из различных источников (CSV, JSON и реляционные базы данных через JDBC). Далее выполняется валидация и предварительная проверка корректности записей.

Следующий этап – маппинг полей с использованием конфигурационного файла fields.properties, что позволяет привести данные к схеме коллекции Solr.

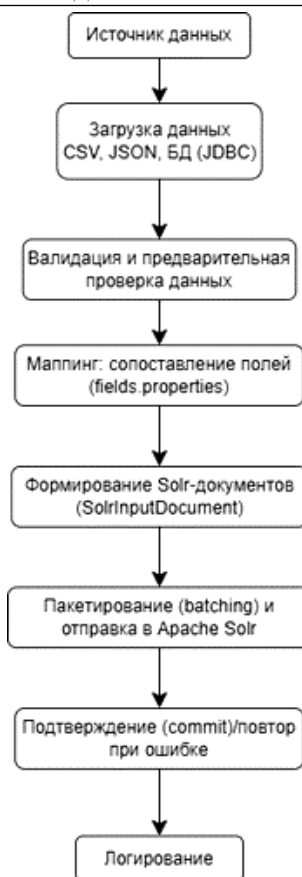


Рис. 1. Логическая модель обработки данных в серверном приложении для интеграции с Apache Solr

После этого осуществляется формирование объектов SolrInputDocument, которые объединяются в пакеты (batching) и передаются в Solr для индексации. Механизм подтверждения (commit) и повторной отправки при ошибке обеспечивает устойчивость процесса.

Завершающим этапом является логирование, фиксирующее все операции и позволяющее отслеживать корректность загрузки.

Представленная логическая модель задаёт основу для дальнейшего проектирования серверного приложения интеграции данных в Apache Solr. Она обеспечивает формализацию этапов обработки информации – от извлечения и валидации до маппинга и индексации, что делает систему предсказуемой и расширяемой. Унификация подхода позволяет снизить трудозатраты на сопровождение и адаптацию решения под новые источники, а модульность обеспечивает возможность постепенного наращивания функционала.

Таким образом, разработанная модель не только восполняет отсутствие встроенного механизма Data Import Handler, но и формирует фундамент для построения масштабируемой корпоративной инфраструктуры поиска и аналитики.

Литература

1. Apache Solr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coderlessons.com/tutorials/bolshie-dannye-i>

analitika/uznaite-apache-solr/apache-solr-arkhitektura, свободный (дата обращения: 25.08.2025).

2. Apache Lucene [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lucene.apache.org/>, свободный (дата обращения: 05.09.2025).

3.DataImportHandler (ДИН) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cwiki.apache.org/confluence/display/SOLR/DataImportHandler>, свободный (дата обращения: 05.09.2025).

4. REST API Solr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://solr.apache.org/guide/solr/latest/configuration-](https://solr.apache.org/guide/solr/latest/configuration-guide/managed-resources.html/)

[guide/managed-resources.html/](https://solr.apache.org/guide/solr/latest/configuration-guide/managed-resources.html/), свободный (дата обращения: 05.09.2025)

Прец Екатерина Андреевна

Студентка каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: eprets@yandex.ru

И.В. Калиткин, Н.С. Репьюк

Речевой корпус данных для изучения речи при постинсультной афазии

Описаны этапы работы для исследования параметров речи людей с постинсультной афазией. Производится выбор критериев для сравнения корпусов данных речи при постинсультной афазии, сравнительный анализ корпусов данных по выбранным критериям, сбор данных и описание процесса формирования собственного корпуса.

Ключевые слова: корпус данных, параметры речевых сигналов, постинсультная афазия.

Согласно статистическим исследованиям в среднем около трети пациентов, перенесших инсульт, страдают от афазии (расстройство, вызывающее затруднения экспрессивной и импрессивной речи) [1]. Повышение качества реабилитации и оценки ее эффективности остается важной и актуальной сферой научной деятельности, поскольку напрямую влияет на качество жизни людей с постинсультной афазией [2]. Для специалистов данной области необходимы корпус данных, содержащие аудиозаписи речи людей с афазией, как основной материал исследовательской деятельности.

Выбор критериев

Для использования корпусов данных, необходим факт их соответствия следующим критериям:

1. Выбираемые корпуса данных должны находиться в открытом доступе для использования без нарушения авторских прав.

2. Записи должны содержать речевые сигналы, принадлежащие одним и тем же спикерам на разных этапах реабилитации и/или до и после инсульта, поскольку при сравнении разных спикеров высока вероятность выделить их индивидуальные особенности (тон, манера, дефекты), не вызванные рассматриваемыми заболеваниями (заикания, картавость и другие) [3].

3. Каждый язык имеет свои особенности, не позволяющие полноценно применить для него результаты исследований, проведенных на данных других языков, например, русский язык высоко флективен и имеет произвольный порядок слов в предложении [4].

Существующие речевые корпуса

Ниже рассмотрены корпуса данных, содержащие речь людей с постинсультной афазией:

1. APROCSA – открытый датасет из лаборатории нейронауки языка Себастьяна (Вандербильт) включает шесть англоязычных видеопроговорок с людьми, перенесшими инсульт и имеющими афазию. Каждая запись длится около часа. В корпус включены результаты транскрипции (процесс перевод каждого диалога в текстовый формат), а также демографические, неврологические и поведенческие характеристики участников (пол, возраст, вид инсульта, объем пораженной области, понимание слов/предложений и др.), что обеспечивает комплексную информацию о состоянии пациентов. Кроме того, приведены результаты научной работы

правовладельцев корпуса данных – представлены согласованные оценки 29 особенностей содержания и стиля речи (например, паузы в высказываниях и между ними, неологизмы, запинки при старте речи и другие) для всех участников по пятибалльной шкале. Однако запись демонстрирует речь каждого интервьюируемого только в один конкретный момент не позволяет анализировать речь на разных этапах реабилитации [5].

2. TORGO – корпус данных, собранный департаментом компьютерных наук Университета Торонто. Свободный доступ предоставляется через регистрацию в Kaggle (онлайн-платформа для соревнований по анализу данных и машинному обучению). Для использования представлены и содержащий аудиозаписи студийного качества речи англоговорящих спикеров 4 групп: мужчины без дизартрии (4 спикера), мужчины с дизартрией (5 спикеров), женщины без дизартрии (3 спикера) и женщины с дизартрией (4 спикера). Всего представлено около 8000 коротких аудиофайлов, относящихся к разным моментам времени, а также отличных по записи: часть с помощью матричного микрофона, а часть – головного [6].

3. Корпус данных AphasiaBank является частью проекта TalkBank и представляет собой мультимедийную базу (видео, аудио, транскрипты) для изучения коммуникации при афазии при разных сценариях на нескольких языках: английский, немецкий, французский, греческий, итальянский, японский, мандаринский, польский, испанский, кантонский, хорватский, румынский и венгерский. В корпус входят данные повторных записей, что позволяет отслеживать динамику восстановления. Доступ к данным предназначен для участников консорциума AphasiaBank и закрыт для широкого круга пользователей [7].

4. Aphasia Trials – международная (более 50 стран) сеть многопрофильных исследователей афазии в области реабилитации, социальных наук, психологии и лингвистики. Участники организации распределены на три группы: общее членство (получение информационных бюллетеней и связанные с ними обновления), членство в рабочей группе (активное участие в исследовательских проектах) и членство терапевтов (консультация исследователей и сотрудничество с рабочими группами). Одна из рабочих групп занята формированием корпусов дан-

ных для научных работ. Информация о составе корпуса, содержащего обезличенные данные из завершённых клинических исследований, недоступна для широкого круга пользователей [8].

5. Russian CliPS Corpus – мультимедийный русскоязычный корпус данных с пересказами стимульного фильма (картина, которая используется в научных исследованиях для сбора повествований) людьми с афазией, поражением правого полушария и здоровыми носителями русского языка. Версия, представленная в нескольких публикациях 2016 г., содержит 39 рассказов людей с различными формами афазии из-за повреждения левого полушария, 5 рассказов авторов люди с поражением правого полушария и без афазии, а также 22 рассказа неврологически здоровых взрослых. Однако корпус не размещен в открытом доступе, а в статье, его описывающей, нет информации о возможности использования собранных в нем данных [9].

6. SONIVA (Speech recOGNition Validation in Aphasia) – закрытый корпус данных. В научных статьях от авторов указано, что SONIVA в числе прочего содержит записи речи одних и тех же англоговорящих спикеров с афазией на нескольких этапах восстановления [10].

В ходе рассмотрения доступных корпусов данных был сделан вывод об их несоответствии критериям, минимально необходимым для проведения запланированной научно-исследовательской работы: большинство не имеет записей на русском, не все содержат повторных записей одних и тех же спикеров на разных периодах реабилитации, а некоторые для предоставления доступа требуют присоединения к своей организации.

Результаты сравнения по выделенным критериям найденных корпусов данных сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение корпусов

Корпус данных	Критерий		
	Открытость	Разные периоды	Записи на русском
APROCSA	Да	Нет	Нет
TORGO	Да	Да	Нет
AphasiaBank	Нет	Да	Нет
Aphasia Trials	Нет	Неизвестно	Неизвестно
Russian CliPS Corpus	Нет	Нет	Да
SONIVA	Нет	Да	Нет

Таким образом, идея об использовании существующих корпусов данных была определена как неподходящая в рамках планируемых экспериментов. Формирование корпуса из самостоятельно собранных данных также не является оптимальным подходом из-за юридических нюансов и требований к обладанию специфическими навыками для работы с пациентами. Было выдвинуто предположение о целесообразности обращения к открытым источникам, а именно личным блогам перенесших инсульт людей, которые делятся прогрессом и нюансами своей реабилитации: отсутствует нарушение автор-

ских прав (использование ведется в некоммерческих целях), а персональные данные спикеров можно просто обезличить.

Сбор данных

Поиск начался с запросов, содержащих ключевые слова «инсульт», «блог», «реабилитация», «афазия» на наиболее популярных видеохостингах. По причине получения на первых страницах результатов поиска неподходящих материалов (научно-популярные видео, интервью с врачами и т.д.) была применена фильтрация по типу контента: теперь в результатах могли появляться только целые блоги вместо отдельных видео. За несколько (около десяти) запросов удалось выделить пять подходящих блогов (располагались на первых страницах результатов поиска), демонстрирующих реабилитацию после инсульта.

Все авторы являются русскоговорящими, однако у троих присутствует акцент. У всех спикеров разный уровень проявления афазии: у трех спикеров речь практически не отличима от речи здорового человека, а у двух имеет ярко выраженные дефекты. Зафиксированные периоды после инсульта в блогах: с 5 до 30 месяцев; с 7 до 16 месяцев; с первых дней до 27 месяцев; с 12 до 39 месяцев; с 15 до 38 месяцев. Всего было выбрано 30 оригинальных записей.

Создание речевого корпуса и его структура

После сбора материалов открытых источников было необходимо отредактировать и конвертировать найденные видео продолжительностью по несколько минут в аудиофайлы, содержащие пару секунд речи (одно или несколько слов) и секундные «беззвучные» вставки в начале и конце (для корректной работы комплекса). В табл. 2 представлены данные о длительности оригинальных записей спикеров и длительности выделенных фрагментов для речевого корпуса.

Таблица 2

Сравнение оригинальных материалов и обработанных для корпуса файлов

Номер спикера	Кол-во оригинальных записей	Кол-во фрагментов для корпуса	Продолжительность оригинального материала, с	Длительность фрагментов для корпуса, с
1	10	19	4 721	84
2	5	24	549	109
3	3	15	2 918	59
4	7	11	3 211	49
5	5	20	723	51

Из видео первого спикера выделены типовые фразы – приветствия, с которого начинается практически каждое видео в блоге. В итоге было сохранено 19 записей. Также происходило выделение идентичных фраз: прочтение одного и того же текста во время трех периодов реабилитации (всего 24 записей) и произнесение чисел от 1 до 10 во время двух периодов реабилитации (всего 20 записей), соответственно для второго и пятого спикера. Однако для третьего и четвертого спикера ввиду отсутствия типовых фраз приветствия и намеренного прочтения

одного текста по несколько раз пришлось выделять схожие по структуре и составу слов фразы (например, «Сейчас я буду показывать упражнение, какое я делал» и «Показываю упражнения, которые я делал», «Сегодня у меня прогулочка, в принципе, как обычно» и «Я вот гуляю, как обычно»): 15 и 11 записей.

Получаемым аудиофайлам присваивались названия формата Спикер<номер>_<время после инсульта>_<фраза> для удобства дальнейшего использования. Всего для пяти спикеров было выделено почти 90 фрагментов, которые в данный момент сохранены на устройстве автора. Подробнее структура комплекса представлена в табл. 3.

Для собранного корпуса данных планируется несколько направлений дальнейшего развития:

1. Использование образцов речевых сигналов большего количества русскоговорящих спикеров для более точных результатов экспериментов.

2. Добавление речевых сигналов не только русскоговорящих спикеров, но и иных спикеров для проведения исследований о различиях и особенностях параметрического описания речи при постинсультной афазии на разных языках.

Таблица 3

Структура комплекса

Номер спикера	Слова / фраза	Зафиксированные моменты времени, месяцев после инсульта
1	Здравствуйте, меня зовут	12, 14, 16, 19,
	Был инсульт, я восстанавливаюсь	21, 23, 25, 28 34, 39
2	Жоам, Бенито и Манозель	5, 27, 30
	Уже бывали во многих бразильских городах	
	А Якита и Минья – никогда	
	Для них это было первое знакомство с Бразилией	
	Не мудрено, что они	
	Придавали ему большое значение	
	С другой стороны	
3	Если Фрагозо, как бродячий цирюльник	1, 5, 27
	Всем, привет	
	Месяц	
	Упражнение, показывать, делал, я	
	Рука	
4	Ноги	4, 19, 21
	Всем, привет, ребята	
	Восстановить / восстанавливаю / восстановление	
	Как обычно, гуляю/прогулочка	
	Рука и нога	
5	Один, два, три, четыре, пять, шесть, семь, восемь, девять, десять	7, 12

В ходе работы проведено сравнение существующих корпусов данных речи при постинсультной афазии для определения возможности их использования в экспериментах по определению значений параметров речевых сигналов. Был собран речевой корпус данных из открытых источников, который имеет потенциал для расширения и использования в экспериментах по определению значений параметров речевых сигналов людей с постинсультной афазией.

Литература

1. Шипкова К.М., Булыгина В.Г. Правое полушарие и восстановление речи при постинсультной афазии / К.М. Шипкова, В.Г. Булыгина // Клиническая и специальная психология. – 2023. – Т. 12, № 1. – С. 104–125.
2. Корсакова Л.Ю. Перспективы в нейропсихологической реабилитации афазии // Молодой ученый. – 2018. – № 1.1 (187.1). – С. 17–20.
3. Гуртуева И.А. Современные проблемы автоматического распознавания речи // Изв. Кабардино-Балкарского научн. центра РАН. – 2020. – № 6 (98). – С. 20–33.
4. Экспериментальная оценка качества распознавания разговорной русской речи / А.А. Кибкало, А.Г. Данилов, А.С. Мышкин, В.Н. Сысоев, Ю.Н. Ромашкин // Речевые технологии. – 2012. – №4 (16). – С. 23–33.
5. APROCSA dataset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://langneurosci.org/aprocsa-dataset/>, свободный (дата обращения: 01.05.2025).
6. TORGO Dataset for Dysarthric Speech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kaggle.com/datasets/pranaykoppula/torgo-audio?select=F_Con, свободный (дата обращения: 01.05.2025).
7. AphasiaBank [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://talkbank.org/aphasia/index.html>, свободный (дата обращения: 01.05.2025).
8. Aphasia Datasets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aphasiatrials.org/aphasia-dataset/>, свободный (дата обращения: 01.05.2025).
9. Russian CliPS: a Corpus of Narratives by Brain-Damaged Individuals / M. Khudyakova, M. Bergelson, Y. Akinina, E. Iskra, S. Toldova, O. Dragoy // LREC Workshop: RaPID. – 2016. – № 23. – С. 22–26.
10. When Whisper Listens to Aphasia: Advancing Robust Post-Stroke Speech Recognition / G. Sanguedolce, S. Brook, D. Gruia, P. Naylor, F. Geranmayeh // Interspeech. 2024. Kos, Greece. – 2024. – С. 1995–1999.

Калиткин Иван Витальевич

Студент каф. комплексной информационной безопасности (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: kiv2@fb.tusur.ru

Репьюк Наталья Сергеевна

Аспирант каф. КИБЭВС ТУСУР
Эл. почта: rns@fb.tusur.ru

УДК 621.396.41

А.В. Щегляков, А.В. Убайчин, Т. Абдирасул уулу, П.П. Ишудченко

Концепт универсального стенда автоматизированного контроля электрических параметров широкого спектра устройств

Представлены основные технические и квалификационные трудности при внедрении автоматизированных стендов. Предложена концепция универсальной измерительной системы для электрического контроля различных устройств. Описана структурная схема данной концепции, требования к функциональным возможностям программного обеспечения, структура и функциональная схема программы универсальной измерительной системы. Представлено описание апробации концепции. Описана программная структура реализованного стенда. Разработанное ПО осуществляет подключение ко всем приборам, самодиагностику кабельных соединений. Имеются два режима работы: полуавтоматический и автоматический. Выявлены недостатки в неавтоматизированном режиме измерения. Цель статьи показать преимущества универсального автоматизированного комплекса контроля электрических параметров широкого спектра устройств. Предлагаемая концепция позволяет решить проблемы, возникающие при внедрении автоматизированных стендов, и значительно повысить точность и оперативность электрических проверок [1].

Ключевые слова: автоматизация, универсальная измерительная система, удалённое управление, C++, библиотека VISA, SCPI.

Значительный рывок развития радиотехнических систем за последние десятилетия привел к их существенному усложнению и комплексированию функциональных возможностей в одном конструктивном устройстве. Усложнение системного исполнения привело к повышению рабочих частот, использованию более широкого спектра частот и использованию алгоритмов обработки разнородных сигналов. Комплексирование возможностей современных радиотехнических систем и устройств обуславливает дополнительные алгоритмические и функциональные требования для измерительных систем, их анализа и испытаний.

Дополнительные сложности возникают при серийном выпуске сложнотехнической продукции: возникает необходимость многократных повторений алгоритмов измерений. Выполнение измерений непосредственно оператором, увеличивает время анализа и вероятность случайных ошибок измерений.

Повышение производительности труда при снижении человеческого фактора на массовом производстве достигается путем использования автоматизации измерений [2, 3]. Возможности современного измерительного оборудования позволяют осуществлять удалённое управление посредством команд Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) через физический уровень интерфейсов ввода-вывода (USB, Ethernet, RS-232, GPIB и т.д.) посредством стандартизированной библиотеки команд VISA.

Для использования SCPI команд необходима подготовка специальных программ управления, выполненных на Си-подобных языках программирования или Python с разработкой соответствующего графического или упрощенного

пользовательского интерфейса в виде программной строки [4–6]. Подготовка программы накладывает дополнительные требования к квалификации оператора (необходимо обладать рядом компетенций по написанию программного кода,

сценариев, алгоритмов и пониманием принципов работы устройства и т.д.), требует сравнительно больших временных затрат и наиболее часто приводит к возникновению отдельной производственной задачи, требующей участия квалифицированных специалистов [7, 8]. Для разных производителей и версий приборов функции и нажатия клавиш (плагины) будут различаться, поэтому пользователи не могут быстро их использовать, им приходится тратить много времени на освоение прибора, что приводит к значительному увеличению времени разработки, а также значительно снижается эффективность [9].

Попытка решения проблемы упрощения автоматизации разнотипных измерений и построения комплексированных алгоритмов частично решена в программных средах LabView, BenchVue и т.д. [10]. Использование этих программных сред отождествляется с дорогостоящими зарубежными приборами (модулями) и лицензиями на использование. Некоторые модули используются только под управлением LabView и не могут быть использованы как прибор для ручного управления.

В представленной статье приведена концепция (принцип) нового программного обеспечения, позволяющего на основе интуитивно понятного интерфейса и базовых принципов графического программирования осуществить автоматизацию процессов измерений комплексированных радиотехнических устройств без повышенных требований к квалификации оператора. Тем самым ускорить и упростить работу по созданию автоматизированного комплекса.

Требования к функциональным возможностям

Перечень основных измеряемых параметров: напряжение, ток, сопротивление, длительность, амплитуда, длительность фронтов, джиттер, амплитудно-частотные характеристик фазы и модуля коэффициентов отражения и передачи, уровень средней и импульсной генерируемой СВЧ-мощности, парамет-

ры спектра генерируемых сигналов, частота, возможность изменения среды распространения или нагрузки. Входящее в состав измерительной системы оборудование должно обладать высокой точностью и чувствительностью, и достаточным динамическим диапазоном.

Структурная схема и алгоритм работы универсального стенда

Структурная схема представлена на рис. 1 и содержит в себе следующие элементы: измеряемое устройство ИУ, лабораторный источник питания ЛИП, векторный анализатор цепей ВАЦ с опцией анализатора спектра АС, измеритель мощности ИМ, персональный компьютер ПК, регулятор среды распространения СР, генератор сигналов произвольной формы Г, осциллограф О, мультиметр М, блок управления БУ.

Помимо самих измерений, необходимо формирование соответствующих сигналов-стимулов. Например, модулирующие импульсы, разрешающие сигналы, логические сигналы синхронизации, модулирующие низкочастотные и СВЧ-сигналы произвольной формы и т.д.

Программное обеспечение (ПО) должно иметь возможность дублирования экранов измерительного оборудования, сохранять протокол измерений (по запросу), экспортировать данные. Иметь возможность удаленного управления всем стендом через сеть интернет посредством мобильного приложения. Измерительная система должна быть надежной и способной безотказно работать в различных условиях.

Преимущества реализации описанных выше требований: универсальность, удалённое управление всем оборудованием, обеспечение гибкой настройки в режиме реального времени, сравнительно простое создание продуманного и прописанного заранее алгоритма (сценария). Автоматический контроль выхода за установленные пределы номи-

нальных значений. Нет необходимости разбираться с меню отдельно взятого прибора устанавливая параметры измерений. Всё это можно было бы сделать посредством одной интуитивно понятной программы.

Принцип реализации ПО в виде основного окна программы реализован частично повторяет MatLab / Simulink и LabView: для работы необходимо собрать структурную (функциональную) схему подключения устройств, состоящую из блоков – эквивалентов реальных приборов, блоков управления приборами, блоков математической обработки, блоков вывода информации и блоков обработки (сохранения) результатов измерений. Отличительной особенностью является установка временных задержек с повышенной точностью, реализация циклов, алгоритмов, конфигурирование по сигналам синхронизации. Конфигурация приборов осуществляется в блоках управления приборами при помощи окна варьируемых параметров.

Функциональная схема работы концепта программы показана на рис. 2, где пользователь должен задать параметры конфигурации в блоке «Параметры конфигурации» и ввести данные в «Пользовательский интерфейс». Условная функция «Main» через «USB/LAN Интерфейс» выполняет «Идентификацию прибора». Затем «Main» обращается к «Базе данных характеристик приборов» и «Базе данных команд» – последние нужны, поскольку команды для приборов одного класса от разных производителей отличаются, а устройства могут иметь дополнительные опции. «Main» формирует команду и через «USB/LAN Интерфейс» отправляет её для «Конфигурации прибора». Также «Формирование команды» может формировать запрос для считывания результатов измерений, состояния прибора и ошибок. Этот принцип подходит для любого количества подключённых приборов к универсальному стенду.

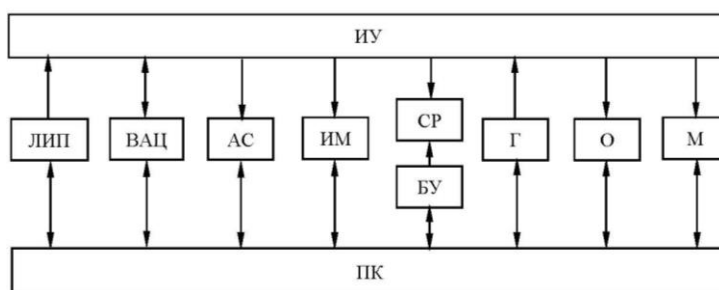


Рис. 1. Структурная схема универсального стенда

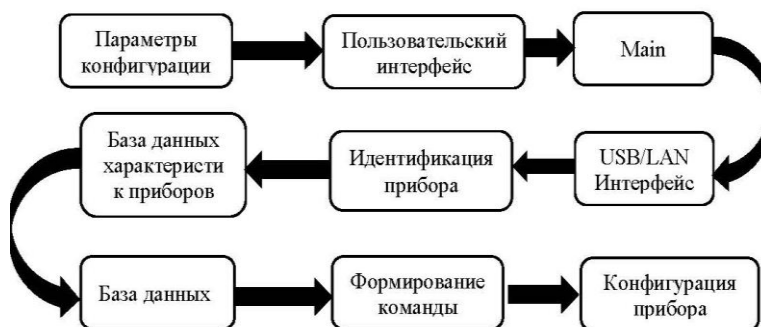


Рис. 2. Функциональная схема работы концепта программы

Апробация концепции

Для проверки и предварительного тестирования разработан стенд автоматизированного контроля параметров пассивно-активной системы дистанционного зондирования. Функциональные возможности разработанного стенда: измерение флуктуационной и пороговой чувствительности, оценка импульсной и измерение средней СВЧ-мощности, формирование стимулов: модулирующего импульса, управляющих аналоговых сигналов, изменение параметров среды распространения и нагрузки СВЧ-устройств, измерение коэффициента отражения, коэффициента передачи, напряжения, тока, мощности и параметров спектра сигнала.

Разработанное ПО подключается ко всем приборам, выполняет самодиагностику кабельных соединений, настройку оборудования, измерения и контроль внешних воздействий на устройство. Есть два режима: полуавтоматический и автоматический. В полуавтоматическом режиме осуществляется контроль токов, напряжений, мощности сигнала и настройка для ручных измерений, таких как длительность импульса, фронты, ширина спектра и др. В автоматическом режиме всё то же самое, но без участия оператора,

с использованием алгоритма, реализующего методику выходного контроля ИУ. Разработаны алгоритмы измерения ширины спектра основного лепестка, амплитуды боковых лепестков и ухода частоты генераторов при изменениях среды и внешних факторов. Алгоритм основан на циклическом воздействии на источник сигнала или среду, определении максимумов и минимумов спектра, а также считывании и сохранении данных с анализатора спектра.

Разработаны алгоритмы для изменения параметров среды распространения и нагрузки СВЧ-устройств, а именно управление коэффициентом стоячей волны и фазой коэффициента отражения согласованной нагрузки [11–13].

Обсуждение

Для измерения большого количества параметров при тестировании устройства оптимально изготовить отдельный автоматизированный стенд. Такой подход целесообразен преимущественно при крупносерийном производстве, где он упрощает, ускоряет контроль и снижает ошибки, а количество стендов растёт с объёмом производства.

При мелкосерийном производстве создание специализированного стенда сомнительно из-за малой партии и частых изменений технологий, что может сделать стенд непригодным. Эту проблему решает универсальный стенд, позволяющий легко модифицировать алгоритмы под конкретную продукцию, поскольку всё необходимое оборудование уже встроено.

Разработка описанного в данной статье программного обеспечения и стенда целиком требует должного финансирования, значительного объёма трудозатрат и большого количества оборудования из демопарка или купленное в состав стенда.

Выводы

Представлен концепт универсального стенда автоматизированного контроля электрических параметров широкого спектра устройств. Приведены структурная схема данного концепта. Описаны структура и функциональная схема работы программного обеспечения для универсального стенда. Описана структура программного обеспечения реализованного стенда. Выявлены недостатки при не автоматизированном режиме работы.

Литература

1. Мисра Д.К. Радиочастотные и микроволновые коммуникационные цепи: анализ и проектирование. – 2-е изд. – Нью-Джерси: John Wiley & Sons, Inc., Хобокен, 2004.
2. Чичакова О. Эффективность автоматизированных измерительных систем / О. Чичакова, П. Штефаничка // Обзор научных измерений. – 2006. – Т. 6, разд. 1, № 4. – С. 50–53.
3. Измерение производительности в автоматизированном производстве / А. Матхур, Г.С. Дангайяч, М.Л. Миттал, М.К. Шарма // Measuring Business Excellence. – 2011. Vol. 15. – P. 77–91. DOI: 10.1108/13683041111113268.
4. Гуили Л. Проектирование виртуального осциллографа на основе интерфейса GPIB и SCPI / Л. Гуили, К. Куаньцунь // IEEE. 11-я междунар. конф. по электронной измерительной технике. – 2011. – С. 294–298. DOI: 10.1109/ICEMI.2013.6743026.
5. Чжэнвэй З. Применение структурных массивов и файлов в системе парсинга SCPI / З. Чжэнвэй, З. Хуихуэй, С. Линь // IEEE. Междунар. конф. по интеллектуальным технологиям вычислений и автоматизации. – 2010. – Т. 3. – С. 710–713. DOI: 10.1109/ICISTA.2010.478.
6. Метод объединенного проектирования программного обеспечения инструмента на основе набора команд SCPI / Ф. Цаймин, З. Чжисианг, З. Йидзю, М. Мин // IEEE. 13-я междунар. конф. по электронной измерительной технике (ICEMI). – 2017. – С. 44–48. DOI: 10.1109/ICEMI.2017.8265709.
7. Переносимый метод проектирования программного обеспечения для функции глубокого хранения цифрового осциллографа / З. Хао, Х. Вухуанг, П. Хуэйцин, Ю. Пэн // IEEE. 12-я междунар. конф. по электронной измерительной технике (ICEMI). – 2015. – С. 893–898. DOI: 10.1109/ICEMI.2015.7494351.
8. Ютянь Ф. Исследование и реализация программного обеспечения инструмента LXI / Ф. Ютянь, Ц. Баода // IEEE. Междунар. конф. по аудио, языку и обработке изображений. – 2010. – С. 473–477. DOI: 10.1109/ICALIP.2010.5684528.
9. Чанг С.С. Проектирование интерфейса программного обеспечения управления инструментом на основе команд SCPI для сокращения времени разработки / С.С. Чанг, Ю.Т. Чиу, С.С. Вэй // 7-я международная конф. по прикладным системным инновациям (ICASI). – 24–25 сентября 2021 г. – 2021. – С. 97–100. DOI: 10.1109/ICASI52993.2021.9568467.
10. Чэн В. Удаленная автоматическая система на базе MatLab с использованием VISA через LAN / В. Чэн, Ф. Ванг, Х. Ма // Междунар. конф. по продвинутым мехатронным системам (ICAMechS). – 2015. – С. 384–387. DOI: 10.1109/ICAMechS.2015.7287094.
11. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023610726, Российская Федерация. Программа управления коэффициентом стоячей волны согласованной

нагрузки: № 2022685773: заявл. 21.12.2022: опубл. 12.01.2023 / А.В. Щегляков, А.В. Убайчин, Г.Г. Жук, Т. Абдирасул уулу.

12. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023610085, Российская Федерация. Программа управления фазой коэффициента отражения согласованной нагрузки: № 2022685774: заявл. 22.12.2022: опубл. 09.01.2023 / А.В. Щегляков, А.В. Убайчин, Г.Г. Жук, Т. Абдирасул уулу.

13. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023614176, Российская Федерация. Программа управления селекцией импульсов по уровню амплитуды: № 2022685736: заявл. 22.12.2022: опубл. 27.02.2023 / А.В. Щегляков, А.В. Убайчин, Г.Г. Жук, Т. Абдирасул уулу.

Убайчин Антон Викторович

Канд. техн. наук, доцент кафРСС ТУСУРа

Гл. конструктор ООО «КБ СПАРТ»

Эл. почта: anton.v.ubaychin@tusur.ru

Абдирасул уулу Тилекбек

Вед. инженер ООО «КБ СПАРТ»,

аспирант каф. РСС, ТУСУРа

Эл. почта: abdirasul.u.t@mail.ru

Ишудченко Павел Павлович

Инженер средств радио и телевидения

ООО ФГУП РТРС «Томский ОРТПЦ»

Эл. почта: pastpolice@mail.ru

Щегляков Артём Владимирович

Вед. инженер ООО «КБ СПАРТ»,

аспирант каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС)

Томского государственного университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Эл. почта: AVSch-ov@yandex.ru

М.В. Свиридов, Е.И. Сафронова, Д.М. Плюхин, П.А. Куминов

Реализация алгоритма подбора кандидатов в мобильном приложении для формирования IT-команд

Разработка алгоритмов автоматизированного формирования проектных команд — ключевая задача для IT-индустрии. Предложен метод оценки кандидатов на основе модифицированной метрики косинусной близости, адаптированной для анализа hard skills, soft skills и опыта командной работы. Интеграция с Lightcast Skills API обеспечивает стандартизацию входных данных алгоритма. Описаны архитектура и функционал мобильного приложения, реализующего данный подход. Основной результат — работающий алгоритм объективной оценки релевантности кандидатов требованиям проекта.

Ключевые слова: IT, специалист, проект, команда, алгоритм подбора, косинусное сходство, ранжирование, компетенции, Lightcast API.

Современная IT-индустрия характеризуется ростом объёма проектной работы и высокой конкуренцией за квалифицированных специалистов. Традиционные методы поиска и оценки кандидатов зачастую требуют значительных временных затрат и подвержены субъективному влиянию. Ключевой проблемой является отсутствие стандартизированного подхода к описанию и сравнению компетенций участников. Данная работа направлена на решение этой проблемы через разработку алгоритма автоматизированной приоритизации кандидатов, использующего в качестве исходных данных актуальный и общепризнанный классификатор навыков.

Интеграция Lightcast Skills API для стандартизации компетенций

Для обеспечения достоверности и актуальности данных о навыках, используемых в алгоритме, была интегрирована система Lightcast Skills API [1]. Это программный интерфейс, предоставляющий доступ к обширной и постоянно обновляемой базе профессиональных компетенций (skills), извлекаемых через анализ миллионов вакансий из открытых источников.

Использование данного API решает несколько критически важных задач:

- *Стандартизация терминов.* API предоставляет единый нормализованный список навыков (как hard, так и soft), что исключает проблему синонимии и различных формулировок одного и того же умения (например, «JS» и «JavaScript») при сравнении кандидата и проекта.

- *Актуальность данных.* База Lightcast постоянно обновляется, отражая текущие требования рынка труда. Это позволяет алгоритму оперировать современными технологиями и компетенциями, а не устаревшими данными.

- *Структуризация.* Навыки в API имеют четкую таксономию, могут группироваться по категориям (например, «Языки программирования», «Фреймворки», «Методологии управления»), что упрощает процесс их выбора пользователем и дальнейшего анализа.

В реализованном приложении при заполнении профиля пользователь не вводит навыки вручную, а выбирает их из поисковой строки, которая в реаль-

ном времени отправляет запросы к Lightcast API и предлагает варианты из официальной базы. Аналогичный механизм используется руководителем при формулировке требований к проекту. Это гарантирует, что вектора компетенций X (проект) и Y (кандидат) строятся на основе единого словаря, что является обязательным условием для корректной работы алгоритма сравнения.

Реализация алгоритма оценки в мобильном приложении

В основе системы подбора лежит алгоритм, рассчитывающий интегральный показатель релевантности (ИПР) [4] кандидата требованиям проекта. Алгоритм оценивает соответствие по трем независимым категориям компетенций: профессиональных навыков (hard skills), личностных качеств (soft skills) и опыта командной работы. Метод основан на модификации классической метрики косинусной близости [2], широко применяемой в задачах информационного поиска и рекомендательных систем. Итоговый ИПР представляет собой взвешенную сумму частичных оценок по каждой категории, где весовые коэффициенты назначаются руководителем проекта в зависимости от специфики задач.

Алгоритм реализован на стороне клиента (мобильное приложение на React Native) для минимизации задержек и нагрузки на сервер. Вычисление происходит в три этапа:

1. *Формирование векторов.* При открытии страницы проекта или профиля кандидата клиентское приложение загружает из локальной базы данных (SQLite) или кэша нормализованные списки навыков, полученные ранее от Lightcast API.

2. *Бинарное сравнение.* Для каждой категории навыков происходит поэлементное сравнение массива требований проекта и массива компетенций кандидата. Каждое совпадение увеличивает счётчик.

3. *Вычисление оценок.* На основе количества совпадений вычисляются частичные оценки для каждой категории. Затем происходит вычисление итогового ИПР с учётом весов, заданных создателем проекта.

Для взаимодействия пользователя с алгоритмом в приложении реализованы следующие интерфейсы:

- **Назначение весов.** При создании или редактировании проекта руководителю доступен слайдер для распределения весовых коэффициентов между тремя категориями. Сумма коэффициентов автоматически нормируется к 1.

- **Визуализация результата.** В списке кандидатов и входящих заявок показатель ИПР отображается в виде числового значения (например, 0,85) и визуального индикатора (прогресс-бара), что позволяет быстро оценить степень соответствия.

- **Сортировка и фильтрация.** Все списки, связанные с подбором (кандидаты, заявки), по умолчанию сортируются по убыванию ИПР. Также реализована фильтрация, позволяющая, например, показать только кандидатов с показателем выше заданного порога.

Реализация функционала приложения

На основе описанной модели и алгоритма реализован следующий пользовательский функционал, соответствующий современным тенденциям в разработке HR-технологий [3]:

- Профиль пользователя: интерфейс для выбора hard и soft skills через интеграцию с Lightcast API.

- Создание проекта (рис. 1): форма с указанием требований к команде, включая необходимые навыки для каждой роли.

Рис. 1. Создание проекта

- **Поиск и приглашение:** экран поиска участников с фильтрацией по ролям и отображением рассчитанного ИПР для каждого кандидата. Возможность отправки персонального приглашения.

- **Лента заявок:** автоматическая сортировка входящих заявок и приглашений по убыванию ИПР.

- **Групповая коммуникация:** автоматическое создание чата проекта при его создании и добавление в него участников по мере их принятия в команду.

Выводы

Таким образом, в ходе исследования была подтверждена эффективность применения модифицированного алгоритма на основе косинусной меры близости для решения задачи автоматизированного подбора участников проектных IT-команд. Критически важным для объективности оценки стала интеграция Lightcast Skills API, обеспечившая стандартизацию и актуальность данных о компетенциях. Разработанное решение позволяет не только значительно сократить временные затраты на формирование команды, но и минимизировать субъективный фактор за счёт перехода к анализу на основе данных. Реализованный алгоритм демонстрирует практическую применимость и может быть использован в образовательной и профессиональной среде для повышения эффективности управления проектными командами.

Литература

1. Lightcast Skills API Documentation. – URL: <https://skills.lightcast.io/> (дата обращения: 20.03.2025).
2. Singh S. et al. A Comparative Study of TF-IDF and Cosine Similarity for Document Search // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2021. – Vol. 10, Iss. 06. – P. 253–257.
3. Методы и технологии анализа данных в подборе персонала: современный взгляд // Информационные технологии в бизнесе. – 2023. – № 2. – С. 15–30.

Свиридов Матвей Васильевич

Студент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа
Эл. почта: matswiridov@yandex.ru

Сафронова Екатерина Игоревна

Студент каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: kat.sfrnv.4947@gmail.com

Плюхин Данил Максимович

Студент каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: pluhindanil46@gmail.com

Куминов Павел Алексеевич

Ассистент каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: pavel.a.kuminov@tusur.ru

П.А. Куминов, А.А. Захарова, Е.В. Телипенко

Принципы разработки модели информационного обеспечения системы развития интеллектуально-инновационного потенциала кадров

Представлены основные принципы, последовательность структуризации информационного поля и разработки модели информационного обеспечения в системе развития инновационно-интеллектуального потенциала кадров. Ключевыми особенностями являются: обеспечение сетевого взаимодействия субъектов (образовательных учреждений, предприятий, органов власти, обучающихся), учет их целей и информационных потребностей на основных этапах принятия решений в сфере подготовки и переподготовки кадров.

Ключевые слова: информационное обеспечение, модель, информационно-образовательная система, сетевое взаимодействие, образовательное учреждение, предприятие, органы власти, кадры, потенциал.

Для обеспечения конкурентоспособности экономики России образовательные учреждения должны своевременно и эффективно готовить и переподготавливать кадры, ориентируясь на текущие и перспективные потребности отраслей промышленности [1]. Особенно актуально это для наукоемких сфер, где требуется выпуск современной конкурентоспособной продукции, поддержание устойчивого экономического роста, продвижение отечественных разработок на мировые рынки, укрепление международных связей и обороноспособности страны. Современные тенденции профессионального образования усиливают необходимость тесного взаимодействия образовательных организаций, предприятий, региональных и муниципальных органов власти при разработке и реализации программ высшего, дополнительного и профессионального образования [2].

Для того чтобы обеспечить своевременную подготовку кадров для страны, регионов, отраслей и предприятий, требуется создание единой информационно-образовательной системы, позволяющей учитывать интересы и потребности всех заинтересованных сторон при развитии инновационного и интеллектуального потенциала рабочей силы [3]. Саморазвивающаяся информационно-образовательная система (СИОС) призвана повысить эффективность такого взаимодействия.

В силу большого объема разнородной информации, обеспечивающей процессы принятия решений в системе развития инновационного и интеллектуального потенциала страны, регионов, отраслей и отдельных крупномасштабных проектов, процесс разработки информационного обеспечения информационной системы (базы данных и базы знаний) должен осуществляться с учетом определенных методологических принципов [4]. Это позволит учесть информационные потребности всех участников системы подготовки кадров (включая учебные заведения, предприятия, органы власти, население), а также выбрать соответствующие формы сбора и хранения информации [5].

Цель работы – определить основные принципы и последовательность структуризации информаци-

онного поля и формирования модели данных в СИОС.

При разработке информационного обеспечения СИОС необходимо учитывать:

- особенности сетевого взаимодействия субъектов;
- многообразие и неоднородность целей участников;
- различие форм и структур данных;
- специфику задач поддержки принятия решений для каждого субъекта системы.

Формирование базы данных СИОС осуществляется при активном участии всех категорий пользователей: органов государственного и муниципального управления, образовательных организаций, работодателей, обучающихся и выпускников. Эти же участники выступают не только поставщиками, но и потребителями данных.

Необходимость создания согласованного информационного пространства для всех субъектов СИОС обуславливает важность системной организации информационных потоков, их классификации и последующей интеграции в единую модель данных, обеспечивающую эффективное взаимодействие и аналитику.

Далее формализуются основные детерминанты задачи разработки модели информационного обеспечения СИОС. Выделим:

1. Множество субъектов сетевого взаимодействия подготовки и переподготовки кадров:

$$S = \{S_1, \dots, S_n\}, i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

2. Множество целей, которые ставит для себя субъект в процессе развития системы подготовки кадров:

$$A_j = \{A_{j1}, \dots, A_{jm_j}\}, j = 1, \dots, m_j. \quad (2)$$

3. Общее множество целей СИОС:

$$A = \bigcup_{i=1}^n A_i. \quad (3)$$

4. Для каждой цели A_{ij} субъекта S_i задается множество этапов процесса принятия решений:

$$P_{ij} = \{P_{ij1}, \dots, P_{ijk}\}, k = 1, \dots, o_{ij}. \quad (4)$$

5. Общее множество этапов:

$$P = \bigcup_{i,j} P_{ij} . \quad (5)$$

6. Для каждого субъекта S_i задается множество совокупностей информационных потоков:

$$F_i = \{F_{i1}, \dots, F_{il}\}, l = 1, \dots, p_i . \quad (6)$$

7. Общее множество потоков:

$$F = \bigcup_i F_i . \quad (7)$$

8. Для каждой тройки (S_i, A_{ij}, P_{ijk}) задается множество конкретных видов информации (информационных сущностей, атрибутов):

$$D_{ijk} = \{D_{ijk1}, \dots, D_{ijke}\}, e = 1, \dots, r_{ijk} . \quad (8)$$

9. Общее множество информационных единиц базы данных:

$$D = \bigcup_{i,j,k} D_{ijk} . \quad (9)$$

Чтобы формализация была пригодна для проектирования модели данных и правил доступа вводят вспомогательные отображения.

1. Функция, отображающая, какие цели преследует этот участник системы:

$$\text{goals} : S \rightarrow 2^A, \text{goals}(S_i) = A_i . \quad (10)$$

2. Функция, задающая список этапов процесса принятия решений, для того чтобы была возможность видеть не просто цели, а последовательность действий:

$$\text{stages} : S \times A \rightarrow 2^P, \text{stages}(S_i, A_j) = P_{ij} . \quad (11)$$

3. Функция, отображающая, какие информационные потоки использует или создает субъект:

$$\text{flows} : S \rightarrow 2^F, \text{flows}(S_i) = F_i . \quad (12)$$

4. Функция, отображающая на каждом этапе процесса реализации конкретной цели субъекта необходимый ему набор конкретных видов информации D_{ijk} :

$$\text{inf} : S \times A \times P \rightarrow 2^D, \text{inf}(S_i, A_j, P_{ijk}) = D_{ijk} . \quad (13)$$

5. Функция для управления безопасностью и правами доступа, представляющая из себя матрицу доступа, отображающая кто из субъектов является источником и/или потребителем конкретный вид информации:

$$\text{access} : S \times D \rightarrow \{0, 1\} . \quad (14)$$

6. Функция для прозрачности и верификации, отображающая для каждого вида информации источник:

$$\text{origin} : D \rightarrow 2^{\{\text{user}, \text{import}, \text{gov}, \dots\}} . \quad (15)$$

Таким образом, процесс структуризации информационного поля и формирования модели данных в СИОС включает следующие последовательные подпроцессы.

1. Определение состава субъектов, заинтересованных в формировании интеллектуально-инновационного потенциала кадров.

2. Формулирование основных целей каждого из субъектов СИОС. Так, например, для вуза – это формирование востребованных на рынке труда образовательных программ, обеспечивающих своевременную подготовку специалистов. Для админи-

страции – обеспечение баланса между имеющимся потенциалом кадров территории и потребностями рынка труда. Для обучающегося – успешная профессиональная карьера, высокий уровень жизни, возможности реализации эффективной индивидуальной образовательной траектории и т.д. Количество сформулированных целей должно быть не меньше количества субъектов системы.

3. Описание процесса принятия решений для достижения главной цели каждого субъекта по основным этапам (например, анализ, выбор, контроль и т.д.).

4. Построение информационной модели выявленных процессов, учитывающей участие в них каждого из субъектов СИОС (в том числе по источникам и потребителям информации), взаимосвязи этапов и нормативно-правовое обеспечение. Количество информационных моделей должно быть не меньше числа субъектов СИОС. Пример фрагмента видов информации для субъекта «образовательная организация» по типу участия в процессе (источник/потребитель) и этапам представлен в таблице.

5. Синтез обобщенной информационной модели.

Виды информации при принятии решений для образовательной организации

Этап процесса	Образовательная организация как источник информации (И)	Образовательная организация как потребитель информации (П)
Мониторинг	Информация об образовательных программах, их содержании, условиях реализации; сведения о ППС; результаты аккредитаций	Информация о текущих и прогнозных вакансиях; требования работодателей к компетенциям выпускников; данные о тенденциях развития рынка труда и отраслей
Анализ	Информация о результатах обучения студентов; данные об их компетенциях, прохождении практик и стажировок; результаты внутренней оценки качества программ	Аналитические сведения о востребованных компетенциях, рейтингах программ, изменениях нормативной базы; обратная связь от работодателей о качестве подготовки
Оценка и выбор	Информация о конкурентоспособности собственных программ, уровне подготовки выпускников; предложения по совместным программам с работодателями	Сравнительные данные о конкурирующих образовательных программах; информация о предпочтениях абитуриентов, студентов, работодателей; критерии выбора программ и направлений подготовки
Контроль реализации	Информация о местах прохождения практик, стажировок студентов, об их результатах; данные о трудоустройстве выпускников	Информация о результатах практик и стажировок, рекомендациях работодателей; аналитика по востребованности программ и трудоустройству выпускников

Анализ таблицы показывает, что многие виды информации пересекаются с потребностями других субъектов СИОС, зачастую дублируются, а также могут быть обеспечены только за счет сетевого взаимодействия субъектов в информационном контуре.

Предложенные принципы и модели информационного обеспечения, последовательность структуризации данных в СИОС обладают теоретической и практической значимостью, так как:

- учитывают особенности сетевого взаимодействия и целевые установки основных субъектов СИОС в формировании и развитии потенциала кадров региона, страны, отрасли, крупных технологических проектов и др.;

- позволяют определить информационные потоки для каждого из субъектов по этапам принятия решений каждого из субъектов, что дает возможность обоснованно выделить состав и содержание задач поддержки принятия решений в СИОС и выбрать методы моделирования;

- являются основой для концептуального проектирования базы данных и базы знаний СИОС, обеспечивающих информационные потребности всех субъектов информационно-образовательной системы развития интеллектуально-инновационного потенциала кадров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-18-00089, <https://rscf.ru/project/25-18-00089/>.

Литература

1. Lizunkov V. G. Effectiveness criteria for interaction between the participants of the educational production cluster within PDA / V.G. Lizunkov, M.V. Morozova, A.A. Zakharova // International Journal of Emerging Technologies in Learning. – 2021. – Vol. 16. – P. 252–260.

2. Иванов Г.А. Цифровизация системы управления образовательной организации высшего образования // Вестник евразийской науки. – 2025. – № s1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://esj.today/PDF/66FAVN125.pdf>, свободный (дата обращения: 10.09.2025).

3. Широколобова А.Г. Основные тенденции цифровой трансформации профессионального образования в России // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: матер. VII междунар. науч. конф. – 2023. – С. 1416–1420.

4. Данилаев Д. П. Современные условия и структура взаимодействия вузов, студентов и работодателей / Д.П. Данилаев, Н.Н. Маливанов // Высшее образование в России – 2017. – № 6. – С. 29–35.

5. Концепция информационной системы поддержки взаимодействия предприятий агропромышленного комплекса, науки и образования / А.Н. Райков, С.И. Антипин, Б.О. Дерябин, И.С. Коробейников, А.О. Петров, С.О. Цепенда // Цифровая экономика – 2022. – Т. 3, № 19. – С. 45–51.

Куминов Павел Алексеевич

Ассистент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: pavel.a.kuminov@tusur.ru

Захарова Александра Александровна

Д-р техн. наук, профе. каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: ppp@zgtu.krvv.ru

Телипенко Елена Викторовна

Канд. техн. наук, доцент отд. цифровых технологий и безопасности Юргинского технологического института (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета (ЮТИ ТПУ)
Эл. почта: telipenko@tpu.ru

А.М. Тернов

Применение компьютерного зрения для автоматического выявления дефектов 3D-печати

Рассмотрена методика преобразования и оценки изображений моделей, печатаемых методом послойного наплавления, позволяющая косвенно определить наличие дефектов печати для автоматической паузы печати.

Ключевые слова: компьютерное зрение, дефекты печати, печать методом послойного наплавления.

Аддитивные технологии на текущий момент прочно укоренились в различных областях, например, в промышленности, медицине, аэрокосмической отрасли. Существует множество типов 3D-принтеров, однако в данной статье будет рассмотрена печать методом послойного наплавления (FDM) [1]. В процессе печати могут возникать разного рода проблемы, которые в лучшем случае ведут к перерасходу материала и потерянным времени, в худшем случае возможна поломка оборудования [2]. Для выявления проблем на ранних стадиях оператор может вести непосредственное или дистанционное наблюдение за процессом печати, однако это несёт за собой значительные трудовые и временные затраты, а также вносит человеческий фактор.

Альтернативой непосредственному наблюдению является автоматизация процесса выявления дефектов при помощи технического зрения.

В настоящее время исследователи и производители в области 3D-печати чаще всего применяют для решения этой задачи нейросети [3]. К плюсам этого подхода можно отнести возможность определения дефектов при меняющихся параметрах, например, освещённости и положения, однако для точного и стабильного определения нескольких видов дефектов требуется провести обучение модели на большом и разнообразном обучающем наборе, что требует наличия больших вычислительных мощностей и большой базы фотографий, содержащих дефекты, подлежащих определению. В связи с этими особенностями большинство подобных систем фокусируется на обнаружении одной или двух разновидностей дефектов.

Альтернативой такому подходу может послужить система обнаружения дефектов с использованием компьютерного зрения на основе открытой библиотеки по обработке изображений OpenCV [4].

Методы и материалы исследования

Целью исследования является определение граничных условий для обнаружения следующих дефектов: отлипание модели от стола, поломка печатаемой модели, окончание материала или засор.

Основной материал для анализа – послойные фотографии, полученные при печати контрольной модели и моделей с искусственно вызванными дефектами. В виде тестового объекта был использован куб со сторонами 20 мм. Тестовый куб при каждой печати располагался в одном месте и печатался из одного материала. Для снижения влияния колебаний

освещённости и теней в помещении с принтером было включено искусственное освещение, а стенки, ограничивающие область печати, покрыты непрозрачным материалом.

Прототип автоматической системы идентификации дефектов был выполнен на основе 3D-принтера flying bear ghost 5, камеры Creality Nebula, сервера контроля печати Octoprint с установленным расширением для создания серии фотографий печатаемой модели по настраиваемым триггерам – Octolapse [5, 6]. Серверная часть выполнялась на одноплатном компьютере Orangepi Zero 2W. Обработка изображений и выполнение программы осуществлялись на компьютере с 64-разрядной системой.

Octolapse в ходе эксперимента был настроен делать снимки каждого нового слоя, на которых с позиции камеры изменяется исключительно печатаемый объект. Эти изображения передавались на компьютер, где поступление нового кадра вызывало запуск программы на языке программирования Python. Путём сравнения изображений предыдущего и текущего слоев с применением библиотеки алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV рассчитывается показатель в виде значения нормализованной среднеквадратичной ошибки (NRMSE), который отражает степень схожести двух изображений соседних слоёв (далее – оценка схожести).

Система также сравнивает текущее изображение с изображением, полученным пятью слоями ранее. Этот параметр называется «отклонение» и вычисляется аналогично оценке схожести. Он демонстрирует, насколько текущий слой отличается от предыдущих. Значение отклонения может быть высоким, если изменения в текущем слое меньше, чем в расположенном на пять слоёв выше. Например, у объектов с крупным основанием само основание занимает много места, и всё, что находится над ним, выглядит меньше, что приводит к высокому отклонению. После нанесения пяти слоёв на деталь, расположенную над основанием, отклонение снижается из-за уменьшения изменений. Используя оценку и отклонение, можно выявить, когда объект отделился от стола или его часть отломилась, а также можно распознать возникновение засора экструдера или окончание материала для печати.

В ходе работы были определены граничные условия для обнаружения следующих дефектов: отлипание модели от стола, поломка печатаемой модели, окончание материала или засор.

Если выполняется любое из условий, соответствующих проблеме, фрагмент программы, отвечающий за управление принтером, отправляет сигнал остановки и фиксирует слой, на котором была инициирована пауза, а также возможную причину остановки. Пороговые значения были выбраны эмпирическим путем в ходе многократных экспериментов.

Дополнительно полученные изображения были проверены на наличие дефектов в тестовой версии сервиса Obico.

Результаты экспериментов

Была проведена серия экспериментов по анализу изображений как успешной печати моделей без дефектов, так и моделей с искусственно спровоцированными дефектами: окончание материала, спутывание экструдированного материала, отлипание модели от стола. Примеры кадров представлены на рис. 1.

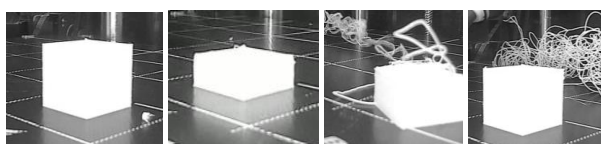


Рис. 1. Внешний вид тестовых моделей

В процессе обработки каждое изображение считывается библиотекой OpenCV в градациях серого, далее из него вычитается фоновое изображение, полученное перед началом печати, выбирается область интереса для дальнейшего анализа и изображение переводится в бинарную форму, после чего производится расчёт оценки схожести или отклонения. На рис. 2 представлен пример последовательности обработки каждого изображения.

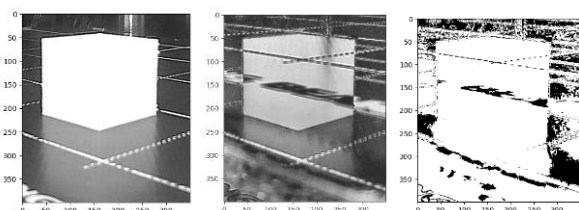


Рис. 2. Пример обработки изображений

Данные, полученные в результате анализа, позволили выявить закономерности, характерные для каждого из рассмотренных видов дефектов. Что позволяет в будущем с достаточно высокой уверенностью выявлять аналогичные проблемы. На текущем этапе выявлены следующие закономерности:

1. Отлипание модели – оценка схожести и отклонение > 1 .
2. Поломка модели – разница оценки схожести и разница отклонения $> 0,2$.

3. Закончился материал/засор – оценка схожести и отклонение $< 0,2$.

Анализ полученных фотографий через сервис Obico, как и заявлено разработчиками, выявил только дефект спутывания печатаемой нити.

Выводы

Анализ полученных результатов показал, что применение методики послойного сравнения печатаемой модели позволяет определять рассмотренные виды дефектов. Для повышения точности и стабильности распознавания коэффициенты и зависимости могут быть дополнительно уточнены и скорректированы на основе расширенной выборки ситуаций. На полученные значения могут оказывать влияние отражения, изменения освещённости и иные внешние возмущения, для минимизации влияния этих факторов рационально ограничить область кадра, а также принять меры по стабилизации уровня освещённости и неизменности фона.

Сравнение представленного метода с общедоступным сервисом по обнаружению дефектов на основе нейросетей показало высокий потенциал по обнаружению нескольких видов дефектов.

Данный метод заслуживает дальнейшего развития и дополнения для возможного определения большего числа дефектов.

Литература

1. Виды, технологии и классификация 3D-принтеров для успешной 3D-печати [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/top3dshop/articles/823254/>; свободный (дата обращения: 04.08.2025).
2. Анализ, классификация и предотвращение образования дефектов в экструзионной 3D-печати / К.С. Ерохин, С.А. Наумов, В.П. Анаников// Успехи химии (Москва). – 2023. – Т. 92, № 11. – RCR5103.
3. Сервис по управлению печатью и поиску дефектов Obico [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.obico.io/docs/user-guides/octoprint-plugin-setup/>; свободный (дата обращения: 05.09.2025).
4. OpenCV [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://opencv.org/>; свободный (дата обращения: 02.09.2025).
5. Octoprint [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://octoprint.org/>; свободный (дата обращения: 03.09.2025).
6. Octolapse [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://plugins.octoprint.org/plugins/octolapse/>; свободный (дата обращения: 03.09.2025).

Тернов Алексей Михайлович

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
Эл. почта: am.ternov@gmail.com

Е. Замерчук, Е.Е. Халтурин, Д.А. Вычужанин, А.М. Исаков

Современный рюкзак: новые технологии для организации и защиты студента

Решается задача разработки и изготовления инновационного рюкзака с функцией метки для удобного отслеживания содержимого через мобильное приложение, а также с системой защиты от перегруза на одно из плеч для обеспечения комфорта и предотвращения травмирования.

Ключевые слова: умные устройства, автоматизация, Arduino IDE, мобильное приложение, студенты.

Современный мир характеризуется стремительным развитием цифровых технологий и повсеместным внедрением интеллектуальных систем в повседневную жизнь человека. Особенно ярко эти процессы проявляются в образовательной сфере, где студенты и преподаватели всё чаще используют современные электронные устройства и сервисы для повышения эффективности обучения. При этом повседневный быт студента остаётся связанным с необходимостью транспортировки значительного количества предметов: учебников, ноутбуков, планшетов, зарядных устройств и других аксессуаров. Использование традиционных рюкзаков при этом сопровождается рядом трудностей: отсутствием возможности контроля содержимого, риском забывания необходимых вещей, а также перегрузкой, создающей угрозу здоровью. Все это формирует предпосылки для поиска новых решений, которые объединяют в себе удобство, безопасность и интеллектуальные возможности.

Проблема перегрузки студенческих рюкзаков подтверждается многочисленными исследованиями в области эргономики и медицины. Так, согласно данным Всемирной организации здравоохранения, регулярное ношение рюкзака с массой, превышающей 10–15% от веса тела, негативно сказывается на состоянии позвоночника и может привести к развитию хронических заболеваний опорно-двигательного аппарата. Для студентов, которые ежедневно носят с собой несколько килограммов книг и электроники, эта проблема становится особенно актуальной. Одновременно с этим существует проблема забывания учебных материалов, которая снижает эффективность подготовки к занятиям и отрицательно влияет на академическую успеваемость. Таким образом, возникает объективная потребность в создании интеллектуального средства переноски, которое не только выполняет традиционные функции хранения, но и обеспечивает организационную и защитную поддержку владельца.

Проект «Умный рюкзак» направлен на решение перечисленных задач. Его основная идея заключается в интеграции современных технологий в привычный предмет повседневного пользования. В отличие от существующих аналогов, которые ограничиваются встроенными аккумуляторами или системами защиты от кражи, предлагаемое решение сочетает функции автоматизированной инвентаризации, кон-

троля нагрузки, GPS-навигации, беспроводной зарядки и взаимодействия с мобильным приложением. Такой рюкзак становится не только средством переноски, но и интеллектуальным помощником, способным адаптироваться к потребностям студента и других категорий пользователей.

Анализ существующих решений показал, что большинство так называемых «смарт-рюкзаков» представляют собой изделия с ограниченным набором функций. Наиболее распространённым является встроенный аккумулятор с возможностью зарядки мобильных устройств через USB-разъём. Встречаются модели с защитой от несанкционированного доступа – например, с замками, потайными карманами или системой оповещения при вскрытии. Некоторые производители предлагают водонепроницаемые материалы и повышенную эргономику конструкции. Однако такие устройства не решают ключевых задач: они не обеспечивают автоматическую проверку содержимого и не контролируют нагрузку на плечи. Отсутствие интеграции с расписанием и образовательными сервисами делает их полезными лишь как удобные аксессуары, но не как интеллектуальные системы. Поэтому необходимость разработки более комплексного решения является очевидной.

Техническая реализация проекта базируется на применении микроконтроллера Arduino, обеспечивающего универсальность и простоту интеграции различных датчиков и модулей. Важнейшим компонентом выступает RFID-система, которая отвечает за идентификацию предметов в рюкзаке. Каждый объект снабжается меткой, содержащей уникальный идентификатор. Считывание осуществляется модулем RC522, который работает на частоте 13,56 МГц. Данные с меток передаются на Arduino, где они преобразуются в удобный для обработки формат, а затем через Bluetooth отправляются на смартфон владельца. В мобильном приложении формируется список предметов, находящихся внутри. Такой подход позволяет пользователю оперативно проверять комплектность рюкзака и исключает вероятность забывания учебных материалов.

Следующей ключевой задачей является контроль нагрузки. Для её решения в проекте применяются тензорезисторы и датчики силы (FSR), расположенные в лямках рюкзака. Они фиксируют изменения сопротивления под воздействием массы и

позволяют вычислять нагрузку на каждое плечо. Микроконтроллер сравнивает полученные значения с предустановленными нормами и при превышении допустимого порога отправляет пользователю уведомление. Эта функция особенно важна для профилактики проблем со здоровьем, так как регулярная перегрузка рюкзака негативно влияет на осанку и вызывает хронические боли.

Система позволяет не только контролировать общую массу, но и оценивать её распределение между лямками, что способствует равномерному ношению и снижает риск травм.

Дополнительной функцией проекта является GPS-навигация. Используемый модуль поддерживает системы GPS, ГЛОНАСС и BeiDou, что обеспечивает высокую точность определения координат. Передача данных осуществляется через интерфейс UART в контроллер Arduino, а затем по Bluetooth в мобильное приложение. Пользователь получает возможность отслеживать местоположение рюкзака в реальном времени, что особенно полезно в случае его утери или кражи.

Функция позиционирования также может применяться для построения маршрутов и мониторинга передвижений в путешествиях.

Одним из важных направлений является обеспечение автономности. Электронная система рюкзака требует стабильного питания, поэтому была реализована схема беспроводной зарядки аккумулятора. Она основана на индуктивном принципе передачи энергии с использованием модуля TP4056 с защитой от перезаряда и повышающего преобразователя MT3608.

Аккумулятор формата 18650 обеспечивает питание микроконтроллера и периферийных модулей, а также может использоваться для подзарядки мобильных устройств владельца. Таким образом, рюкзак превращается в мобильную энергетическую платформу, которая повышает комфорт пользователя в условиях ограниченного доступа к электросети.

Мобильное приложение выполняет роль центрального интерфейса. Через него пользователь получает доступ к данным о содержимом, нагрузке, местоположении и состоянии аккумулятора. В перспективе приложение может быть дополнено функциями интеллектуальных напоминаний, которые будут анализировать расписание студента и сравнивать его с содержимым рюкзака. Это позволит исключить ситуации, когда студент забывает учебные материалы или оборудование.

Кроме того, возможно создание облачного сервиса, где будут храниться данные об использовании рюкзака, что откроет новые возможности для анализа и персонализации.

Практическая апробация проекта показала высокую эффективность выбранных решений. RFID-система обеспечивает надёжную и быструю идентификацию предметов. Сенсорные модули точно фиксируют нагрузку и позволяют предупреждать пользователя о перегрузе. GPS-модуль демонстриру-

ет точность позиционирования до 3 метров, что достаточно для практических задач. Система беспроводной зарядки обеспечивает стабильное питание и позволяет продлить автономность работы. Все элементы успешно интегрированы в единую аппаратно-программную архитектуру, что подтверждает техническую реализуемость концепции.

Ожидаемые эффекты от внедрения «умного рюкзака» включают повышение эффективности учебного процесса, улучшение организации времени и снижение рисков, связанных со здоровьем. Пользователь получает инструмент, который помогает планировать занятия, сохранять физическое здоровье и повышать уровень безопасности.

Универсальность функций делает устройство привлекательным не только для студентов, но и для всех, кто ценит технологичность и комфорт в повседневной жизни.

Сценарии применения рюкзака разнообразны. В образовательной среде он может использоваться для подготовки к занятиям, автоматической проверки наличия учебных материалов и защиты здоровья. В повседневной жизни функции GPS и беспроводной зарядки делают его полезным для активных пользователей. В путешествиях рюкзак обеспечивает контроль маршрутов и автономность. В перспективе возможна интеграция с системами умного дома или корпоративными платформами, что расширяет сферу его применения.

Перспективы развития проекта связаны с миниатюризацией аппаратной части, снижением энергопотребления и расширением функционала программного обеспечения. Возможна интеграция технологий искусственного интеллекта, которые будут анализировать поведение пользователя и предлагать оптимальные сценарии использования. Интересным направлением является внедрение систем биометрического контроля, например датчиков пульса или осанки, что позволит расширить спектр задач в области здоровья. Важным является и вопрос стандартизации интерфейсов для обеспечения совместимости с другими устройствами в экосистеме умных технологий.

В результате проведённой разработки подтверждена техническая реализуемость концепции «умного рюкзака» как комплексного носимого устройства, интегрирующего средства RFID-идентификации, сенсорные модули контроля нагрузки, системы беспроводной связи и питания. Созданный прототип демонстрирует возможность эффективного объединения указанных технологий в единой аппаратно-программной архитектуре, обеспечивающей автоматизированный контроль содержимого, мониторинг нагрузки и передачу данных в мобильное приложение.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшей оптимизации конструкции и расширения функционала устройства для практического применения в образовательной и повседневной среде.

Литература

1. Гололобов В. С чего начинаются роботы? О проекте Arduino для школьников (и не только). – М.: СОЛОН-Пресс, 2011. – 225 с.
2. Платт Чарльз. Электроника для начинающих. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012 – 480 с.
3. Коммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino. – СПб.: БХВ, 2010. – 241 с.
4. Применение технологии радиочастотной идентификации (rfid) в современной системе образования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiya-radiochastotnoy-identifikatsii-rfid-v-sovremennoy-sisteme-obrazovaniya>, свободный (дата обращения: 16.10.2024).
5. Безопасность Rfid-Систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezopasnost-rfid-sistem>, свободный (дата обращения: 28.10.2024).

Замерчук Егор

Студент каф. радиоэлектроники и систем связи (РСС)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: zamerchuk21@mail.ru

Халтурин Евгений Евгеньевич

Студент каф. РСС ТУСУРа
Эл. почта: eugene.halturin@yandex.ru

Вычужанин Данил Алексеевич

Студент каф. РСС ТУСУРа
Эл. почта: vychuzhaninda.1a2rtf@gmail.com

Исаков Александр Михайлович

Ст. преп. каф. автоматизированных систем управления
(АСУ) ТУСУРа
Эл. почта: aleksandr.m.isakov@tusur.ru

М.Е. Захаров, Т.В. Ганджа

Применение компьютерного моделирования для усовершенствованного управления перекачивания углеводородного сырья с целью исключения гидроударов в трубопроводной системе

Рассматривается применение компьютерного моделирования и систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) для решения актуальной задачи — предотвращения гидроударов при перекачке углеводородного сырья. Гидроудар, возникающий при резком изменении скорости потока в замкнутой трубопроводной системе, представляет серьёзную угрозу, способную привести к механическому повреждению оборудования и остановке технологического процесса. Для минимизации этих рисков предлагается создать цифровой двойник узла перекачки на основе математической модели насосного агрегата, реализованной в специализированной среде моделирования «МАРС». Система управления, построенная на принципах прогнозирующего регулирования, использует эту модель для прогнозирования поведения процесса и формирования оптимальных управляющих воздействий на электроприводы регулирующих клапанов. Такой подход позволяет активно компенсировать возмущения и предотвращать аварийные ситуации, повышая надёжность и срок службы оборудования без необходимости его физической модернизации.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, цифровой двойник, автоматизированная система управления технологического процесса (АСУ ТП), математическая модель узла перекачки углеводородного сырья, системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП).

Объекты нефтяной промышленности являются сложными технологическими объектами, включающими в себя множество исполнительных устройств, технологических параметров и переменных, а также режимы работы агрегатов. Ввиду сложности состава технологических систем, вопросы управления и регулирования на нефтегазовых предприятиях очень актуальны. Выход на качественные рабочие границы позволит технологическим объектам добиться увеличения их экономической эффективности, улучшить качество выпускаемой продукции, и повысить экономическую эффективность.

Одной из главных проблем на нефтедобывающих объектах, при перекачивании сырья является опасность гидроудара в системе. Поэтому в данной статье рассматриваются возможные оптимизационные воздействия на установку перекачивания углеводородного сырья с целью исключения (минимизации) гидроударов в трубопроводной системе.

Гидроудар возникает при резком изменении скорости потока сырья в замкнутой системе, что приводит к резкому скачку давления. Его опасность заключается в механическом повреждении трубопровода и в выводе из строя исполнительных механизмов и агрегатов (насосных агрегатов, запорной/регулирующей арматуры). Для минимизации подобных рисков в системах управления технологических объектов нефтегазовой отрасли применяют цифровые инструменты оптимизации. Одним из таких инструментов является компьютерное моделирование [5].

В компьютерной среде моделирования, разрабатывается математическая модель, реализуется программный компонент, выполняющий роль цифрового двойника реального физического объекта и по результатам анализа вычислительного эксперимента,

подбираются оптимальные для протекания технологического процесса значения. Данный подход и применение виртуальных прототипов (цифровых двойников) в большинстве случаев позволяет достичь цели управления.

В отраслевой области зачастую встречаются динамические процессы с изменяющимися со временем технологическими параметрами и переменными. В подобных процессах невозможно применение настроенного однажды регулятора. Коэффициенты и значения необходимо менять постоянно, основываясь на изменениях в технологическом процессе. Следовательно, необходима постоянная надстройка коэффициентов, которая будет оптимально учитывать изменения в технологической системе, и будет эффективной для технологического процесса. В таких ситуациях в инженерной практике большое распространение получают системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП) или как часто можно встретить в зарубежной литературе — APC systems (Advanced Process Control). APC представляет собой стратегию управления, основанную на различных технологиях и методах, опирающихся на математическое моделирование, и позволяющих максимально оптимизировать технологический процесс.

Компьютерная модель аппарата является его виртуальным представлением, созданным с учётом требований к управляющей системе и описанным на основании математических методов [4]. Для регулирования исполнительными устройствами и надстройкой коэффициентов рабочих параметров в режиме реального времени, необходимы цифровые инструменты и подходы СУУ ТП. Совокупность этих инструментов и подходов позволит добиться лучшего управления и регулирования на нефтегазо-

вых предприятиях. Преимуществом подобных оптимизационных операций является улучшенное управление технологическим процессом, не за счёт модернизации объекта (приобретения нового технологического оборудования), а за счёт усовершенствования параметров существующего управляемого объекта.

Математическое моделирование насосного агрегата

Технологический узел перекачивания углеводородного сырья (рис. 1) состоит из следующего оборудования:

- датчик давления (РТ) на всасывающем трубопроводе;
- датчик давления (РТ) на напорном трубопроводе;
- манометры (РГ) на всасывающем и напорном трубопроводе;
- насосный агрегат (НА);
- электрической задвижки (ВЭЛЗ) на всасывающем трубопроводе;
- электрической задвижки (НЭЛЗ) на напорном трубопроводе.

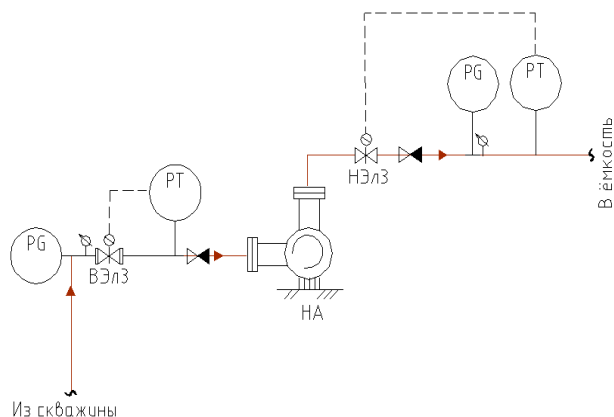


Рис. 1. Схема трубопроводной обвязки, контрольно-измерительных приборов и автоматики технологического узла перекачки углеводородного сырья

Рассмотрим процесс моделирования насосного агрегата данного узла в среде моделирования. Для решения исследовательских и вычислительных задач, предлагается использование среды моделирования «МАРС» [1, 2], которая позволяет автоматизировать анализ простых технических объектов с выводом его результатов на различные средства визуализации в виде статических значений наблюдаемых переменных и их временных, частотных и параметрических характеристик.

Метод компонентных цепей, на котором реализована «МАРС» [3] является универсальным методом компьютерного моделирования физически неоднородных объектов в статическом и динамическом (во временной и частотной областях) режимах. Математическая модель насосного агрегата реализуется программно в среде моделирования.

Вычислительный программный модуль среды моделирования решает алгебраические выражения,

после чего на визуальном слое отображаются значения. Результаты после проведения вычислительного эксперимента далее необходимо интегрировать в специализированную операционную систему реального времени (RTOS), которая распределяет задачи и управляет их выполнением с высокой точностью, обеспечивая предсказуемость, надёжность и синхронизацию работы системы. Для этого на автоматизированных объектах необходимы программные корректировки рабочих систем и алгоритмов.

Регулирование электрических клапанов

Основная цель оптимизационных воздействий на узел перекачивания – это регулирование электрической регулирующей арматуры (клапанов) для адекватного управления и минимизации гидроударов в технологической цепочке. Алгоритм системы управления технологическим процессом периодически, через фиксированные промежутки времени, обращается к математической модели процесса, созданной ранее в среде моделирования. На основе этой модели и актуальных данных, поступающих с датчиков и измерительных приборов, он прогнозирует дальнейшее поведение системы. Затем алгоритм рассчитывает и формирует оптимальные управляющие воздействия, реализуя заданные критерии эффективности.

Для регулирования давления потока жидкости в системе используются регулирующие клапаны с электроприводом. Сигналы от датчиков и измерительных преобразователей транзитом через входные аналоговые/дискретные модули, передаются в программируемый логический контроллер (ПЛК), где обрабатываются. В тоже время ПЛК выступает в качестве управляющего устройства. СУУТП получает от распределённой системы управления (РСУ) текущие технологические параметры, рассчитывает оптимальные уставки на основе прогнозирующих моделей и передает их в подчиненные ПИД-регуляторы для поддержания процесса в заданных границах.

Регулирование осуществляется не реактивно, т.е. с реакцией на уже возникшую ошибку, а прогнозируемо. Система, при помощи анализа модели, предвидит будущее поведение процесса, активно компенсирует возмущения и предотвращает аварийные состояния (перегрузку). Таким образом предотвращается перегрузка трубопроводной системы и агрегатов, что повышает надежность и продлевает срок службы оборудования.

Структура системы усовершенствованного управления и организация подключения с РСУ показана на рис. 2.

Заключение

Применение компьютерного моделирования и систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) является эффективным и экономически выгодным решением для повышения надежности и безопасности эксплуатации нефтегазового оборудования. В частности, для решения критически важной задачи предотвращения

гидроударов в трубопроводных системах перекачки углеводородного сырья, традиционные методы управления оказываются недостаточными.

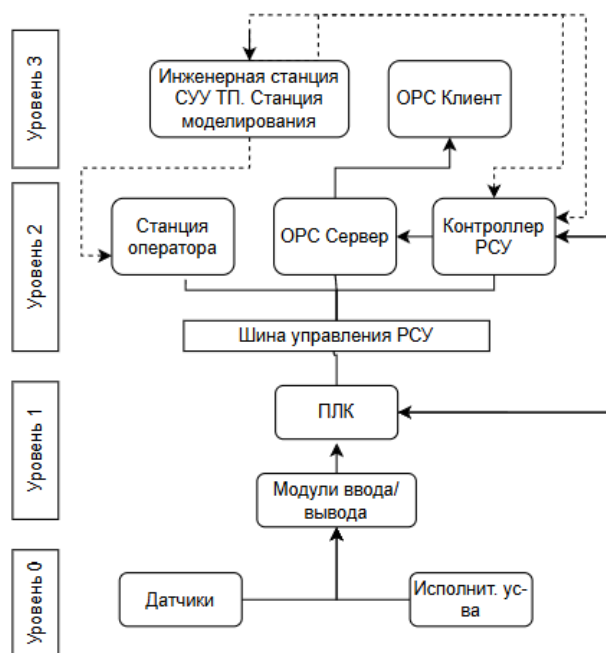


Рис. 2. Структура системы усовершенствованного управления ТП

Предложен комплексный подход, основанный на создании цифрового двойника узла перекачки в специализированной среде моделирования «МАРС». Этот виртуальный прототип позволяет с высокой точностью воспроизводить динамику реального процесса, включая переходные режимы работы насосного агрегата, которые являются основной причиной возникновения гидроударов. На основе полученной математической модели реализуется система управления, использующая принципы прогнозирующего регулирования.

В отличие от реактивных систем, реагирующих на уже возникшие отклонения, предложенные подходы СУУТП анализируют будущее поведение объекта и формируют оптимальные управляющие воздействия на электроприводы регулирующих клапанов заблаговременно. Это позволяет активно компенсировать возмущения и плавно изменять параметры и переменные потока, исключая резкие скачки давления в системе.

Таким образом, внедрение данной технологии позволит значительно снизить риск механического повреждения трубопроводов и оборудования, повысить общую надежность технологического процесса и продлить срок службы дорогостоящих агрегатов – и всё это без необходимости капитальной модернизации или замены физического оборудования, исключительно за счет оптимизации программно-алгоритмической составляющей системы управления.

Литература

1. МАРС – среда моделирования технических устройств и систем / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.
2. Дмитриев В.М. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 111.
3. Дмитриев В.М. Автоматизация моделирования промышленных роботов / В.М. Дмитриев, Л.А. Арайс, А.В. Шутенков. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
4. Захаров М.Е. Компьютерное моделирование теплообменного аппарата атомных электростанций для оптимизации теплотехнических характеристик / М.Е. Захаров, Т.В. Ганджа, К.Е. Захаров // Электронные средства и системы управления: матер. науч.-практ. конф., Томск, ТУСУР, 2024: в 2 т. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2024. – Т. 1. – 335 с.
5. Захаров М.Е. Компьютерное моделирование теплообменника печи пиролиза для оптимизации процесса пиролиза углеводородов / М.Е. Захаров, Т.В. Ганджа // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА-2024), Минск, 25–26 апреля 2024 г.: матер. междунар. науч.-практ. конф.: – Минск: Белорусский гос. ун-т, 2024. – Т. 1. – 168 с.

Захаров Михаил Евгеньевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: epsn97@mail.ru

Ганджа Тарас Викторович

Д-р техн. наук, проф. каф. КСУП ТУСУРа
Эл. почта: gangatv@gmail.com

Р.М. Закирзянов

Выбор параметров модифицированного алгоритма муравьиных колоний для оптимизации структуры автоматизированной системы управления крупным промышленным объектом

Приводится описание задачи поиска оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупного промышленного объекта. Предлагаются различные способы решения задачи. Дается описание метаэвристического алгоритма муравьиных колоний для построения оптимальной древовидной структуры системы управления. Рассматриваются варианты выбора параметров указанного алгоритма.

Ключевые слова: распределенная система управления, метаэвристический алгоритм, автоматизированная система управления, структурная оптимизация.

Технологические процессы современных промышленных предприятий требуют надежных и функциональных систем управления. Особенные требования предъявляются к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУТП) крупных промышленных объектов, характеризующихся большим количеством параметров и территориальной распределенностью.

Как правило, АСУТП таких объектов строятся на базе программно-технических комплексов (ПТК). ПТК АСУТП состоит из большого количества серийно выпускаемых промышленностью компонентов, соединенных различными каналами связи. Поскольку характеристики компонентов задаются заводами-изготовителями, функциональные возможности полученной системы во многом определяются ее структурой.

Оптимизация структуры производственной системы является важной задачей в различных отраслях [1]. Актуальной является задача построения такой структуры системы управления, которая бы надлежащим образом решала задачу управления промышленным объектом, удовлетворяла требуемым ограничениям и имела бы при этом минимальную стоимость.

Критерии оптимизации и ограничения для системы сформулированы в [2].

Постановка задачи

Современные АСУТП, как правило, имеют древовидную иерархическую структуру. Такую структуру можно представить в виде графа $g = (v, \varepsilon)$ (рис. 1), где $v \in V$ – компоненты системы, устройства (вершины графа), ε – ребра графа (каналы связи, соединяющие устройства).

Иерархия содержит S уровней: уровень 1 – корень дерева, уровень S – листья дерева.

Пусть задано множество возможных типов устройств $U = \{u_1, \dots, u_U\}$, состоящее из U типов устройств. Данное множество представляет собой различные серийно выпускаемые промышленностью компоненты системы управления.

Каждое устройство может обладать функцией обработки информации (процессор, обработчик), либо только функцией передачи информации на вышестоящий или нижестоящий уровень (ретранслятор).

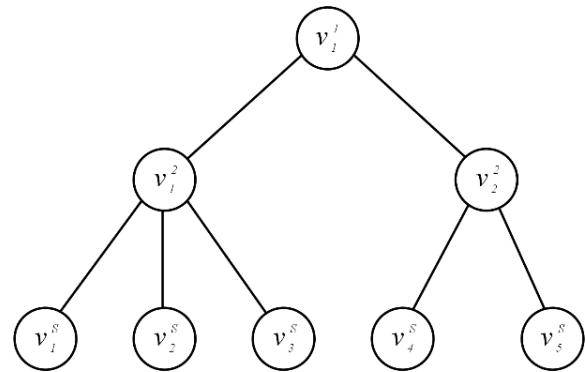


Рис. 1. Структура системы управления в виде графа

Каждый тип $u_i \in U$ узла структуры характеризуется рядом параметров, таких как стоимость устройства, количество подключаемых физических каналов, максимальный объем памяти, вероятность отказа устройства, производительность (время выполнения одной программной инструкции), режим работы (обработчик/ретранслятор), максимальное количество дочерних устройств, задержка передачи (только для ретрансляторов).

Для характеристики объекта управления введем множество контуров управления $A = \{a_1, \dots, a_A\}$, состоящее из A контуров.

Каждый контур физически должен быть подключен только к одному устройству иерархии, находящемуся на нижнем уровне S -уровне листьев дерева. В то же время каждый контур должен быть назначен обработчику, который может находиться на любом уровне иерархии, включая корень.

Для соответствия модели реальным техническим системам вводится ряд ограничений: по надежности системы, времени обработки контура и др. Полная постановка задачи приведена в [3]. Целевая функция, определяющая стоимость системы как сумму стоимостей ее компонентов, будет иметь вид:

$$C_0 = \min_g \sum_{v \in V} C_v. \quad (1)$$

Таким образом, необходимо подобрать такую иерархическую структуру из узлов заранее заданных типов, чтобы доставить минимум целевой функции (1) при заданных ограничениях.

Методы решения

Поставленная задача является задачей дискретной оптимизации с множественными ограничениями. Задача может быть решена точными, приближенными методами или методами, основанными на нейросетевых технологиях.

Точные методы дают точное решение, но требуют больших вычислительных ресурсов, поэтому применимы только при небольших размерностях задачи.

Приближенные методы, такие как метаэвристические биоинспирированные алгоритмы [4], широко применяются для решения подобного класса задач. Данные методы не дают точного решения, однако менее требовательны к вычислительным ресурсам, и при определенных условиях могут быть использованы для решения описанной задачи.

Для решения задачи оптимизации структуры системы управления был выбран алгоритм муравьиных колоний. Данный алгоритм находит в настоящее время широкое применение для решения различных задач оптимизации [5, 6].

Алгоритм муравьиных колоний

Описание алгоритма муравьиных колоний (Ant Colony Optimization (ACO) – англ.) дано в [7]. Особенностью алгоритма является то, что в нем происходит запоминание лучших решений посредством испаряющихся с определенной скоростью следов – феромонов [5].

Выбор каждого шага производится согласно правилу:

$$P_i = \tau_i^\alpha \eta_i^\beta / \sum_{k=0}^N \tau_k^\alpha \eta_k^\beta, \quad (2)$$

где P_i – вероятность выбора i -го варианта, τ – количество феромона, η – стоимость варианта, α – параметр, характеризующий вес феромона («стадность»), β – параметр, характеризующий вес эвристики («жадность»), N – общее количество допустимых вариантов.

Обновление количества феромона происходит по формуле (3):

$$\tau_{i+1} = (1 - \rho)\tau_i + \Delta\tau_i, \quad (3)$$

где ρ – коэффициент испарения феромона, $\Delta\tau_i$ – количество отложенного феромона (депозит).

В данной задаче каждый шаг муравья разбивается на несколько действий (выбор типа нового устройства, выбор количества дочерних устройств, назначение контуров и т.д.). Каждый выбор делается с вероятностью, определяемой выражением (2).

Муравей последовательно стоит дерево от корня к листьям путем добавления вершин графа. Каждая итерация алгоритма завершается, если построено допустимое дерево. После построения производится проверка ограничений. В случае нарушения ограничений решение отбрасывается.

Для реализации алгоритма было разработано программное обеспечение на языке Python, с помощью которого был решен ряд численных примеров.

Примененный метаэвристический алгоритм не дает точное решение. Близость полученного решения к оптимальному во многом определяется способом задания начальных условий и выбором параметров алгоритма. Как видно из рис. 2, алгоритм имеет склонность застревать на локальных оптимумах.

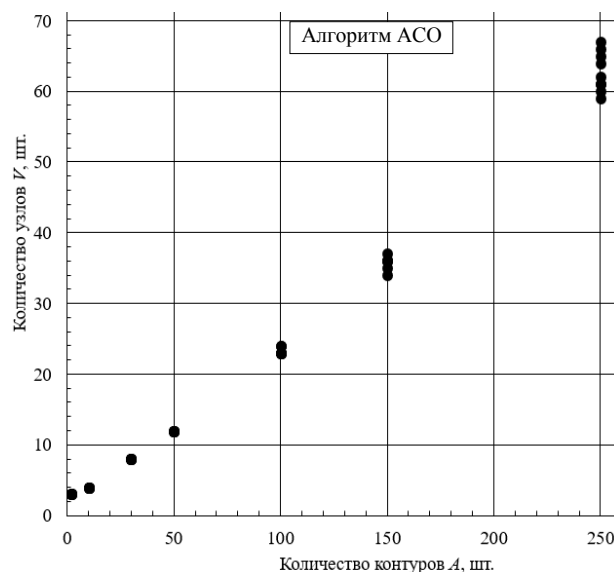


Рис. 2. Результат работы алгоритма до модификации

Модификация алгоритма

Разработано достаточно большое количество модификаций муравьиного алгоритма, решающих те или иные присущие алгоритму проблемы [8].

Для предотвращения застревания на локальных оптимумах в данном исследовании алгоритм был модифицирован путем добавления локального поиска вблизи предполагаемого оптимума. Локальный поиск производит следующие действия: замена типа устройства, слияние соседних узлов, удаление устройства, перенос контура на соседний узел.

Результат работы алгоритма после добавления локального поиска представлен на рис. 3.

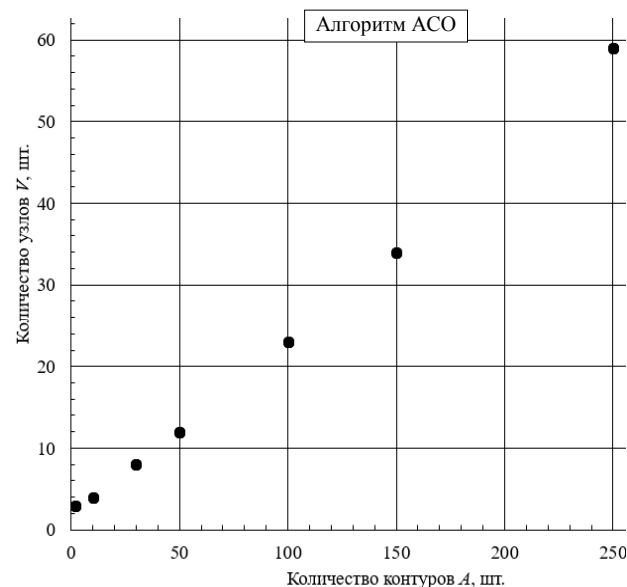


Рис. 3. Результат работы алгоритма после модификации

Выбор параметров алгоритма

Выбор параметров алгоритма в значительной мере влияет на сходимость. С помощью разработанного программного обеспечения решен ряд тестовых примеров для оценки влияния параметров на сходимость алгоритма. Вычисления проводились для системы с тремя уровнями иерархии ($S = 3$), количеством типов устройств $U = 4$ и количеством контуров управления $A = 39$. Для эксперимента были выбраны параметры, указанные в таблице. Разработанное программное обеспечение позволяет задавать параметры алгоритма как в виде констант, так и в виде функций от аргумента n , где n – номер итерации алгоритма.

Параметры эксперимента

Номер эксперимента	Параметры алгоритма		
	ρ	α	β
1	0,25	1,0	0,0
2	0,25	$1+0,1n$	$1/n$
3	$0,25+0,05n$	$1+0,2n$	$1/(2n)$
4	0,25	$1+1/n$	$0,02n$

По полученным в результате вычислительных экспериментов данным построены графики сходимости алгоритма. Графики показаны на рис. 4.

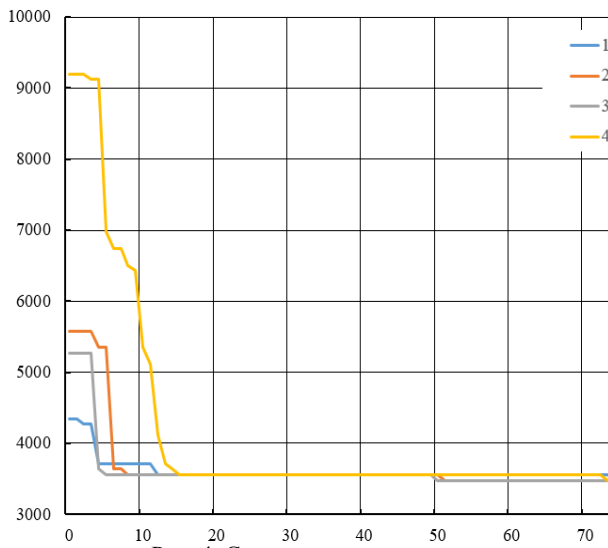


Рис. 4. Сходимость алгоритма

Вычисления показывают, что при всех заданных параметрах алгоритм сходится к оптимальному значению стоимости $C_0 = 3478$, полученному при решении задачи точным методом. При этом наилучшие результаты достигаются при использовании постоянных параметров при $\beta = 0$. При увеличении «жадности» алгоритма происходит замедление сходимости. Однако, как показали другие эксперименты, при больших размерностях задачи общими ре-

комендациями будет увеличение «жадности» на начальном этапе работы алгоритма с увеличением влияния феромонов по мере приближения к целевому значению.

Заключение

В статье описана задача оптимизации иерархической структуры промышленной системы управления, построенной на базе программно-технического комплекса, приведены методы решения. Проведено исследование решения задачи с использованием метаэвристического алгоритма оптимизации. Даны рекомендации по модификации алгоритма, проанализирован выбор параметров алгоритма.

Литература

1. Резчиков А.Ф. Алгоритм оптимизации структур робототехнических сборочных комплексов / А.Ф. Резчиков, А.А. Большаков, Д.Ю. Петров, Д.Д. Яковлев // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 5. – С. 3–10.
2. Закирзянов Р.М. Критерии выбора оптимальной структуры распределенной системы управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 10. – С. 17–23.
3. Закирзянов Р.М. Применение метаэвристических алгоритмов для оптимизации структуры промышленной системы управления // VI Междунар. науч. конф. по проблемам управления в технических системах (ПУТС–2025): сб. докл. – СПб., 26–28 сентября 2025 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2025. – С. 35–37.
4. Гладков Л.А. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации / Л.А. Гладков, Ю.А. Кравченко, В.В. Курейчик, С.И. Родзин. – Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2024. – 228 с.
5. Shyu Shyong Yin. Ant-Tree: An ant colony optimization approach to the generalized minimum spanning tree problem / Shyu Shyong Yin, Peng-Yeng Lin, Bertrand Haouari Mohamed // J. Exp. Theor. Artif. Intell. – 2003. – Vol. 15. – P. 103–112. DOI: 10.1080/0952813021000032699.
6. Lebedev B.K. Modified swarm algorithm «ant tree» in the problem of diversification of tractor resources spaces / B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, O.A. Purchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 22–27.05.2020. – Novosibirsk, 2020. – Vol. 918. – P. 012082.
7. M. Dorigo, T. Stützle, 2004. Ant Colony Optimization MIT Press. ISBN 0-262-04219-3.
8. Курейчик В.М. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма / В.М. Курейчик, А.А. Кажаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 4 (81). – С. 7–12.

Закирзянов Руслан Марселевич

Технический директор ООО «НЕКСТ инжиниринг»
Эл. почта: zr@nexteng.ru

В.А. Курандин, Р.О. Хушкадамов, Н.В. Котюков

Инновационный рюкзак

Разработать и произвести инновационный рюкзак с функцией метки для удобного отслеживания содержимого через мобильное приложение, а также с системой защиты от перегруза на одно из плеч для обеспечения комфорта и предотвращения травмирования.

Ключевые слова: умные устройства, автоматизация, Arduino IDE, мобильное приложение, студенты.

Инновационный рюкзак – это современный проект, направленный на повышение удобства и безопасности для учеников и студентов. С помощью интегрированных датчиков и мобильного приложения пользователи могут отслеживать ключевые показатели рюкзака, такие как геолокация, вес, заряд устройства, а также список находящихся внутри предметов с использованием Arduino и RFID-меток. Проект активно развивается, и на данный момент достигнуты значительные успехи в разработке.

Текущее состояние проекта

На данный момент команда почти завершила проектирование пользовательского интерфейса приложения, который доступен в двух цветовых вариантах: светлой и темной. Дизайн разрабатывался в Figma[1], что позволило создать современный, интуитивно понятный и удобный интерфейс, соответствующий последним трендам в области UX/UI. Использование Figma обеспечило команде возможность эффективного взаимодействия между дизайнерами и разработчиками, а также упростило процесс адаптации интерфейса под различные устройства.

Для реализации программной части была выбрана кроссплатформенная среда разработки Qt [2], которая предоставляет широкие возможности для создания графических интерфейсов и работы с внешними устройствами. Основным языком программирования в рамках проекта является C++ [3], что позволяет добиться высокой производительности и оптимизации кода. Изучена структура Qt, включая модули для работы с Bluetooth, сетевыми протоколами и базами данных. Это обеспечивает надежную основу для дальнейшего развития проекта.

Также проведено тестирование базового функционала приложения на эмуляторе Android, что позволило выявить и устранить ряд потенциальных проблем на ранней стадии.

Архитектура приложения

Основные компоненты архитектуры приложения включают:

1. Модуль регистрации и настройки: при первом запуске пользователь может зарегистрироваться, добавить RFID-метки для своих вещей, выбрать язык (русский/английский) и настроить параметры приложения.

2. Главное меню: отображает ключевые показатели рюкзака, такие как уровень заряда, текущий вес и местоположение.

3. Экран настроек: позволяет устанавливать предельный вес, добавлять новые RFID-метки, изменять тему приложения и выполнять другие настройки.

Представление планируемого дизайна главного меню и окна меток в приложении представлен на рис. 1.

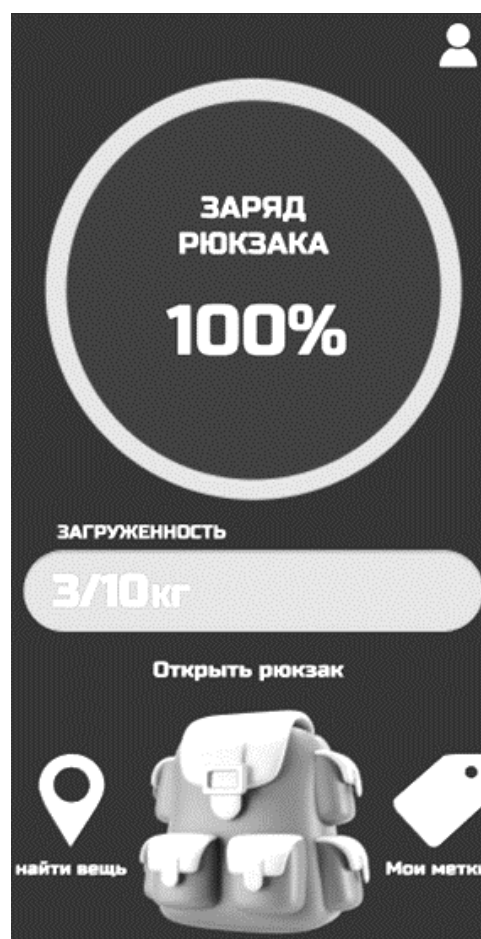


Рис. 1. Главное меню приложения

Техническая реализация

Техническая часть проекта включает использование микроконтроллера Arduino для управления датчиками внутри рюкзака. Датчики веса помогают контролировать нагрузку на спину пользователя, снижая риск проблем со здоровьем. RFID-метки позволяют точно отслеживать наличие каждого предмета в рюкзаке, а GPS-модуль обеспечивает точное определение местоположения. Все данные передаются через Bluetooth [3] на мобильное при-

ложение, где они обрабатываются и отображаются в удобном для пользователя виде.

Ниже представлена архитектура приложения, на рис. 2.

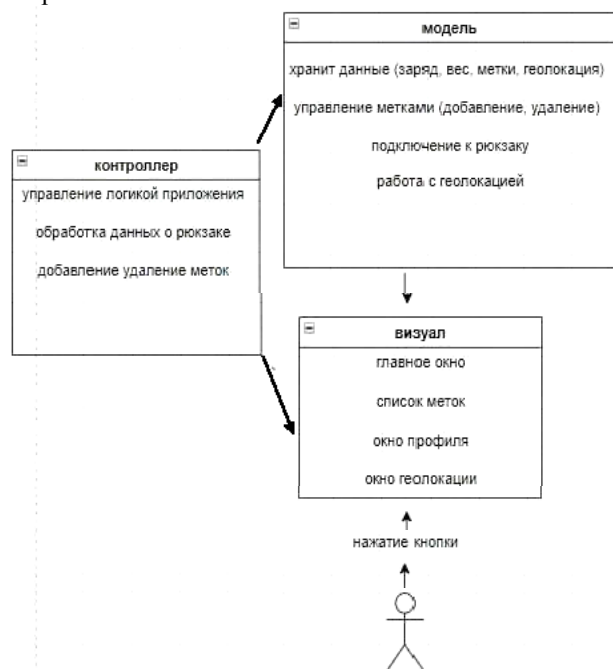


Рис. 2. Архитектура приложения

Реализация мобильного приложения

Создание мобильного приложения для взаимодействия с «умным» рюкзаком включает несколько ключевых этапов. На первом этапе разработчики определяют архитектурный паттерн приложения – в данном случае используется подход Model-View-Controller (MVC), что позволяет отделить логику обработки данных от пользовательского интерфейса. Это упрощает поддержку кода и ускоряет процесс тестирования отдельных компонентов. Взаимодействие с микроконтроллером Arduino осуществляется через Bluetooth Low Energy (BLE), для чего в приложении реализован специальный сервис, отвечающий за сканирование доступных устройств, установку соединения и обмен данными в реальном времени.

Для работы с RFID-метками и отображения списка предметов в рюкзаке приложение использует локальную базу данных (например, SQLite), в которой хранятся привязки между уникальными идентификаторами меток и названиями предметов, заданными пользователем. При получении сигнала от RFID-ридера, встроенного в рюкзак, приложение сверяет полученный UID с записями в базе и обновляет интерфейс – отмечая, какие предметы находятся внутри, а какие отсутствуют. Такой подход делает систему гибкой и удобной для повседневного использования.

Особое внимание уделяется энергоэффективности и стабильности соединения. Поскольку приложение должно работать в фоновом режиме для отслеживания местоположения и веса, разработчики применяют оптимизированные алгоритмы обработки данных и минимизируют частоту запросов к сен-

сорам, чтобы не разряжать батарею устройства. Кроме того, предусмотрена система кэширования данных на случай временной потери связи с рюкзаком – информация восстанавливается автоматически при восстановлении соединения. Эти меры обеспечивают надёжную и бесперебойную работу приложения в реальных условиях эксплуатации.

При разработке приложения на основе фреймворка Qt активно используются встроенные модули, такие как Qt Bluetooth – для организации взаимодействия с микроконтроллером Arduino, Qt Location – для интеграции карт и отображения геопозиции рюкзака, а также Qt SQL – для работы с локальной базой данных предметов, привязанных к RFID-меткам. Для создания адаптивного интерфейса применяется Qt Quick с QML, что упрощает проектирование современных UI-компонентов и их быструю настройку под разные разрешения экранов. Кроме того, при необходимости асинхронной обработки данных или фоновых задач задействуется Qt Concurrent и QThread, что обеспечивает плавную работу интерфейса без «подвисаний» даже при интенсивном обмене данными с устройством.

В ближайших планах – проведение тестирования приложения на реальных устройствах, доработка пользовательского интерфейса с учетом обратной связи от первых пользователей и расширение функционала. Например, планируется добавить возможность отправки уведомлений родителям о положении рюкзака или превышении допустимого веса.

Заключение

Предлагаемое решение способно значительно улучшить повседневную жизнь школьников и студентов, а также принести спокойствие их родителям. Благодаря использованию современных технологий, таких как Qt, Arduino и Bluetooth, проект демонстрирует высокий потенциал для масштабирования и внедрения в реальную жизнь.

Литература

1. Руководство по Figma. – Режим доступа: <https://www.figma.com/community/file/81382610092741663>, свободный (дата обращения: 19.09.2025).
2. Руководство QT creator. – Режим доступа: <https://doc.qt.io/qtcreator/creator-overview.html>, свободный (дата обращения: 19.09.2025).
3. Документация по C++. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/cpp/cpp/?view=msvc-170>, свободный (дата обращения: 19.09.2025).

Курандин Владислав Александрович

Студент Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: kurandin2004@bk.ru

Котюков Никита Васильевич

Студент ТУСУРа
Эл. почта: n.kotyukov@gmail.com

Хушкадамов Руслан Отамшоевич

Студент ТУСУРа
Эл. почта: psanr04@gmail.com

Д.Р. Белкова, М.А. Рудникович

Технологии облачных вычислений в системном анализе: преимущества и риски

Рассматриваются основные аспекты применения облачных вычислений в системном анализе, а также анализируются их преимущества и потенциальные риски. Облачные технологии значительно ускоряют обработку больших данных и повышают гибкость в принятии решений, однако внедрение таких технологий сопряжено с рядом угроз для безопасности и конфиденциальности данных. Оценка рисков и грамотное использование облачных решений являются ключевыми для успешной реализации проектов в области системного анализа. Рассматривается опыт применения облачных технологий в реальных проектах и предоставляет рекомендации по минимизации рисков.

Ключевые слова: облачные вычисления, системный анализ, безопасность, риски, преимущества, рекомендации.

Облачные вычисления представляют собой модель вычислений, при которой ресурсы, такие как вычислительная мощность, хранилища данных, и другие сервисы, предоставляются через интернет [1]. Эти технологии кардинально изменили подход к организации вычислительных ресурсов, позволив повысить гибкость, снизить затраты и ускорить процессы. Системный анализ, в свою очередь, представляет собой важнейший процесс в разработке решений для бизнеса и других областей, требующих обработки и анализа больших данных. Облачные технологии являются мощным инструментом, который активно используется для решения задач системного анализа. Тем не менее, применение облачных вычислений сопровождается рядом рисков, связанных с безопасностью данных, зависимостью от поставщиков и юридическими аспектами.

Преимущества облачных вычислений в системном анализе

Облачные вычисления предлагают значительные преимущества для системного анализа, в корне меняя обработку и хранение данных. Одним из ключевых достоинств является существенное ускорение обработки данных. В облачных системах данные могут обрабатываться параллельно на мощных вычислительных платформах, что значительно сокращает время, необходимое для анализа больших массивов информации. Это становится особенно важным в ситуациях, где необходимы быстрые решения на основе анализа данных, таких как в финансовых и медицинских системах.

Кроме того, облачные вычисления позволяют существенно снизить затраты на инфраструктуру. Традиционные вычислительные системы требуют значительных инвестиций в оборудование, его обслуживание и обновление. В случае с облачными сервисами организации платят только за те ресурсы, которые реально используют, что делает модели облачных вычислений экономически выгодными, гибкими и масштабируемыми. Это дает возможность быстро наращивать или сокращать вычислительные ресурсы в зависимости от потребностей бизнеса.

Облачные платформы предоставляют встроенные сервисы искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа больших данных (например,

AWS SageMaker, Google AI Platform) [2]. Это позволяет системным аналитикам применять сложные аналитические методы без необходимости самостоятельной разработки и поддержки дорогостоящего программного обеспечения, снижая порог входа для инноваций.

Помимо доступа к сложным инструментам, облачные технологии решают и ключевую проблему координации усилий. Так, облачные платформы предоставляют единую среду для работы распределенных команд аналитиков. Все участники проекта имеют доступ к актуальным данным и инструментам из любой точки мира, что ускоряет согласование и повышает согласованность результатов анализа. Это исключает проблему работы с устаревшими или конфликтующими версиями данных.

Таким образом, облачные вычисления кардинально усиливают системный анализ. Этот комплекс преимуществ не только оптимизирует аналитические процессы, но и открывает новые возможности для качественного и оперативного принятия управленческих решений.

Риски использования облачных вычислений в системном анализе

Однако использование облачных вычислений не лишено рисков, которые необходимо учитывать при внедрении таких решений. Одним из основных является угроза безопасности данных. Хранение данных в облаке повышает риски их утечки, взлома или несанкционированного доступа, так как данные передаются через интернет и находятся на серверах третьих сторон. В условиях жесткой конкуренции и атак со стороны киберпреступников этот риск значительно возрастает, и организации вынуждены инвестировать в технологии защиты данных, такие как шифрование и аутентификация [3].

Еще одним риском является зависимость от поставщика облачных услуг. Компании, использующие облачные решения, становятся уязвимыми к изменениям в политике этих поставщиков, таким как повышение цен, снижение качества обслуживания или прекращение предоставления необходимых сервисов. В случае сбоев в работе облачных сервисов, организации могут потерять доступ к критически важным данным, что может привести к серьезным последствиям, особенно в случае с финансовыми

или медицинскими организациями, где данные имеют первостепенное значение.

Кроме того, правовые и регуляторные риски также играют важную роль в применении облачных технологий. Размещение данных в облаке часто связано с необходимостью соблюдения различных законодательных норм, касающихся защиты персональных данных, конфиденциальности и соблюдения юридических стандартов. В случае работы с облачными сервисами, расположенными в других странах, могут возникнуть проблемы с соблюдением местных законов, что потребует дополнительных усилий для обеспечения юридической безопасности данных.

Примеры применения облачных технологий в системном анализе

Облачные вычисления находят широкое применение в различных областях, включая здравоохранение, финансы, логистику и многие другие. В сфере здравоохранения они значительно ускоряют обработку и анализ больших объемов медицинских данных. Врачам из разных регионов теперь доступна возможность обмена данными в реальном времени, что позволяет быстрее принимать решения на основе актуальной информации. Благодаря облачным платформам, медицинские учреждения могут хранить и обрабатывать данные о пациентах, включая изображения, результаты лабораторных исследований и электронные медицинские карты, что ускоряет диагностику и лечение. Для таких задач облачные платформы предлагают высокоэффективные алгоритмы для анализа изображений, например, рентгеновских снимков, с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволяет не только повысить точность диагностики, но и облегчить доступ к качественному медицинскому обслуживанию для пациентов в удаленных регионах, где могут отсутствовать высококвалифицированные специалисты.

В финансовой сфере облачные технологии применяются для анализа транзакций, прогнозирования рисков и предотвращения мошенничества. Благодаря обработке данных в реальном времени финансовые учреждения оперативно выявляют аномальные операции, такие как подозрительные переводы. Использование машинного обучения позволяет автоматически блокировать потенциально опасные действия, минимизируя финансовые потери.

Кроме того, облачные сервисы обеспечивают прогнозирование рыночных рисков (колебания курсов, изменения ставок) на основе анализа больших данных о рыночных трендах и экономических факторах. Это позволяет компаниям и инвесторам принимать более обоснованные решения в условиях нестабильности финансовых рынков.

Помимо медицины и финансов, облачные технологии активно применяются в других отраслях. В логистике они используются для оптимизации маршрутов и управления цепочками поставок, что помогает компаниям снижать транспортные расходы

и повышать эффективность работы. Использование облачных платформ позволяет образовательным учреждениям разрабатывать и внедрять персонализированные программы обучения, а также анализировать успехи студентов, что помогает улучшить качество образования.

Интеграция облачных технологий в различные сферы позволяет компаниям и организациям принимать более обоснованные решения, повышать конкурентоспособность и минимизировать риски, что делает облачные вычисления важным инструментом для современного системного анализа.

Заключение

Исследование демонстрирует значительный потенциал облачных технологий для модернизации системного анализа. Ключевые преимущества – высокая производительность, экономическая эффективность и доступ к современным аналитическим инструментам. Они открывают новые возможности для повышения качества управленческих решений.

Однако реализация этого потенциала требует комплексного управления рисками, включая вопросы безопасности данных, зависимости от поставщиков и соблюдения нормативных требований. Примеры успешного применения в здравоохранении, финансах и логистике подтверждают, что баланс между преимуществами и рисками достигается через продуманную стратегию внедрения.

Для дальнейшего успешного использования облачных технологий важно решить две основные задачи. Во-первых, нужно создать гибкие системы управления рисками, которые подходили бы для смешанных облачных сред. Во-вторых, необходимо помнить, что эффективная работа зависит не только от технологий, но и от людей. Это требует пересмотра рабочих процессов и обучения сотрудников новым навыкам.

Литература

1. Что такое облачные вычисления? Обзор облака [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atlassian.com/ru/microservices/cloud-computing>, свободный (дата обращения: 19.09.2025);
2. AI and machine learning products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cloud.google.com/products/ai>, свободный (дата обращения: 20.09.2025);
3. Что такое киберпреступность? Как защититься? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/what-is-cybercrime>, свободный (дата обращения: 21.09.2025).

Белкова Дана Руслановна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: belkovadana06714@gmail.com

Рудникович Марина Андреевна

Студентка каф. БИС ТУСУРа
Эл. почта: marrud.275@gmail.com

Секция 14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатели – Комнатнов Максим Евгеньевич,
доцент каф. ТУ, к.т.н.;*

Черникова Евгения Борисовна, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

УДК 53.537.9

И.С. Кеда, О.А. Доценко

Электромагнитные характеристики композитов, содержащих многостенные углеродные нанотрубки

Приведены результаты измерений частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов, изготовленных из акриловой краски с добавлением многостенных углеродных нанотрубок с концентрациями 0,5; 1,0; 1,5 мас.%. Исходная смесь подвергалась ультразвуковой обработке зондом погружного типа с частотой 25 кГц и мощностью 25 Вт. Установлено, что продолжительность ультразвуковой обработки исходной смеси оказывает влияние на комплексную диэлектрическую проницаемость исследуемых образцов, что даёт возможность изготовить материалы с различными электрофизическими свойствами без изменения начального состава.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, композит, ультразвуковая обработка, диэлектрическая проницаемость, конденсаторный метод.

В современном мире применение наноматериалов становится неотъемлемой частью электронного материаловедения. Полимерные композитные материалы, модифицированные углеродными наноструктурами, привлекают пристальное внимание исследователей и демонстрируют высокий потенциал для применения в промышленных масштабах.

Многочисленные исследования показывают, что углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие уникальным сочетанием физических и химических свойств, при добавлении в диэлектрические полимерные матрицы позволяют целенаправленно регулировать такие ключевые электромагнитные параметры композита, как комплексная диэлектрическая проницаемость и эффективность экранирования электромагнитного излучения.

В зависимости от количества графитовых слоев их делят на одностенные и многостенные. Последние отличаются большей стабильностью свойств. Показано, что их электропроводность существенно изменяется в зависимости от числа стенок, метода получения, особенностей кристаллической структуры, наличия структурных дефектов [1–3] и играет ключевую роль, определяя перспективы использования в различных областях [4]. Многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) применяются в отраслях: электроника, космическая индустрия, авиация, медицина, машиностроение и судостроение.

Целью данной работы является исследование электрофизических свойств наноразмерных композиционных материалов с включениями углеродных нанотрубок. Состав материалов был следующий: связующее – акриловая краска (ООО «НПП «Рогнеда», ст. Купавна, Московская обл.), в которую для уменьшения вязкости добавлялась вода дистиллированная «Кристалльная» (ООО «МиС», г. Томск); наполнитель – МУНТ (ИК СО РАН, г. Новосибирск) длиной не более 15 мкм и средним диаметром 9,4 нм.

Для исследования были изготовлены композиты с концентрацией многостенных углеродных нанотрубок 0,5; 1,0; 1,5 мас.%. Длительность обработки ультразвуком варьировала от 1 до 5 мин при постоянной мощности излучателя, равной 25 Вт.

Процесс изготовления экспериментальных образцов подробно описан в работах [5–7].

Измерения образцов осуществлялись в диапазоне частот от 10 Гц до 2 МГц конденсаторным методом [8]. Полученные с помощью LCR-измерителя значения ёмкости и сопротивления пересчитывались в диэлектрическую проницаемость согласно формулам, приведённым в источниках [8, 9].

На рис. 1 и 2 представлены графики действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 Гц до 2 МГц.

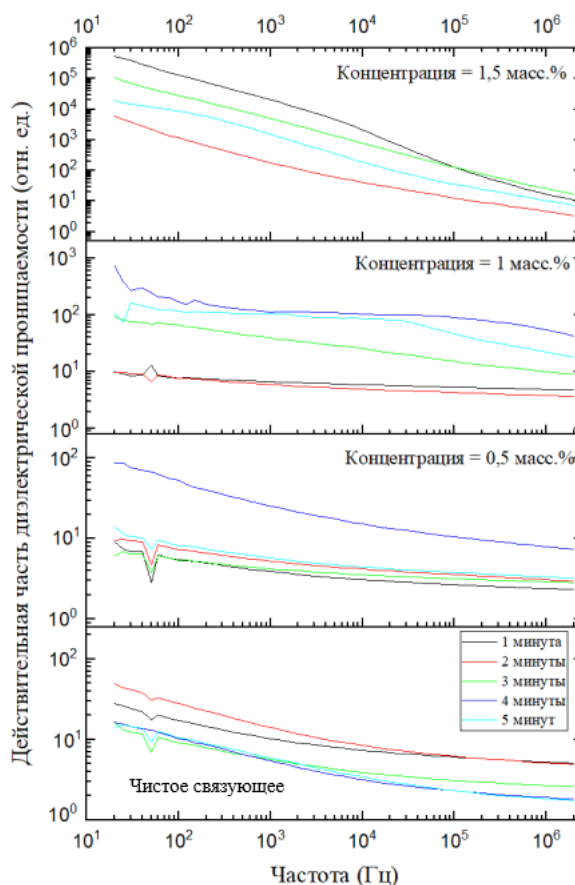


Рис. 1. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости при разном времени обработки ультразвуком для разных концентраций МУНТ

Из рис.1 видно, что для концентрации 0,5 и 1,0 мас.% значения ДП остаются почти неизменными в исследуемом диапазоне, а при концентрации 1,5 мас.% наблюдается её уменьшение с ростом частоты. Такое поведение диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии в диэлектрике заряженных частиц, которые могут поляризоваться по нескольким механизмам: ионному, электронному и дипольному.

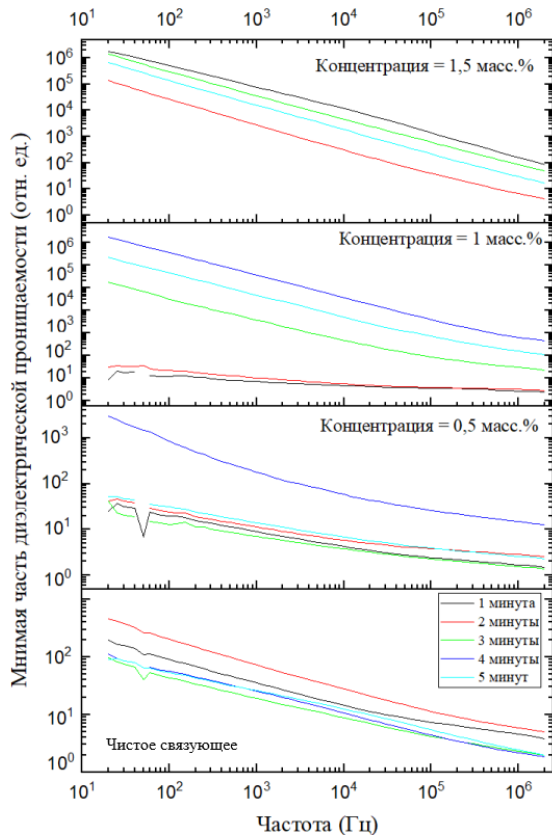


Рис. 2. Частотные зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости при разном времени обработки ультразвуком для разных концентраций МУНТ

Полученные результаты показывают, что при добавлении углеродных нанотрубок в акриловую краску наблюдается явное увеличение ДП по сравнению с чистой краской. При концентрации МУНТ, равной 1,5 мас.%, в композите появляется перколяционная сетка, на что косвенно указывают большие значения ДП у данных образцов. Применение ультразвуковой обработки помогает разбить агломераты углеродных нанотрубок, что способствует более равномерному распределению многостенных углеродных нанотрубок в объеме композитного материала. При 1,0 мас.% резкое увеличение мнимой части ДП наблюдается при временах обработки ультразвуком, равным 3, 4 и 5 мин, что указывает на перестройку внутренней структуры наполнителя в композите.

В результате обработки фиксируется увеличение как действительной, так и мнимой составляю-

щих ДП у композитов, содержащих МУНТ. Кроме того, экспериментально определено оптимальное время ультразвуковой обработки 4 мин, при котором достигаются максимальные значения комплексной ДП у рассматриваемых композитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-79-00048, <https://rscf.ru/project/24-79-00048/>.

Литература

1. Friedrich K. Polymer composites: from nano- to macro-scale / K. Friedrich, S. Fakirov, Zh. Zhang. – New York: Springer, 2005. – 367 p.
2. Yedra A. Conductive paints development through nanotechnology / A. Yedra, G. Gutierrez-Somavilla, C. Manteca-Martinez // Progress in Organic Coatings. – 2016. – Vol. 95. – P. 85–90.
3. Милейко С.Т. Композиты и наноструктуры // Композиты и наноструктуры. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 6–37.
4. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
5. Кеда И.С. Влияние параметров ультразвуковой обработки на комплексную диэлектрическую проницаемость композита с многостенными углеродными нанотрубками / И.С. Кеда, О.А. Доценко // Современные проблемы физико-математических наук: матер. X Всерос. науч.-практ. конф., 2024. – С. 229–234.
6. Кеда И.С. Диэлектрическая проницаемость композитов с углеродными нанотрубками в радиодиапазоне / И.С. Кеда, О.А. Доценко // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. РФИВ-2024: тезисы докладов III Рос. науч. конф. – 2024. – С. 92–93.
7. Кеда И.С. Электрофизические характеристики композитов с углеродными нанотрубками / И.С. Кеда, О.А. Доценко // XXIX Всерос. научн. конф. студентов-физиков и молодых ученых: матер. конф. – Москва; Пушкино; Черноголовка; Дубна: ЮФУ, 2025. – С. 151–152.
8. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ / В.А. Журавлев, В.И. Суслаев, Е.Ю. Коровин, О.А. Доценко // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2010. – № 35. – С. 404–411.
9. Electromagnetic waves absorbing characteristics of composite material containing carbonyl iron particles / V.A. Zhuravlev, V.I. Suslyaev, E.Y. Korovin, K.V. Dorozhkin // Materials Sciences and Applications. – 2014. – Vol. 5, № 11. – P. 803–811.

Кеда Инна Сергеевна

Аспирант каф. радиоэлектроники (КРЭ)
Национального исследовательского
Томского государственного ун-та (НИ ТГУ)
Эл. почта: kedainna@mail.ru

Доценко Ольга Александровна

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. КРЭ НИ ТГУ,
доцент каф. конструирования узлов и деталей
радиоэлектронной аппаратуры (КУДР)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: dol@mail.tsu.ru

В.А. Фещуков, С.В. Смирнов, А.А. Квасников

Разработка прототипа программного модуля САПР для создания и взаимодействия с трехмерными геометрическими моделями

Представлена разработка прототипа программного модуля системы автоматизированного проектирования (САПР), предназначенного для создания и взаимодействия с трёхмерными геометрическими моделями. На основе анализа выявлены минимальные требования к функциональным возможностям разрабатываемого модуля. С учетом этих требований выполнена программная реализация основных методов модуля на языке программирования C++ с использованием программных библиотек OpenCASCADE и Visualization Toolkit. Предложена программная архитектура модуля, объединяющая разработанные функциональные возможности единым интерфейсом взаимодействия и обеспечивающая устойчивость к некорректным входным данным. Предложенный модуль может быть интегрирован в САПР.

Ключевые слова: геометрический редактор, программная архитектура, C++, система автоматизированного проектирования.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) широко применяются на предприятиях, занимающихся разработкой радиоэлектронной аппаратуры. Использование САПР позволяет сократить сроки и трудозатраты на проектирование, повысить точность расчётов и ускорить выход изделий на стадию производства [1]. В Российской Федерации наблюдается дефицит отечественных решений в области САПР. В связи с этим ведутся активные разработки программных комплексов, предназначенных для замещения [2] зарубежного программного обеспечения.

Неотъемлемой частью любой САПР является геометрический редактор, предназначенный для создания трёхмерных моделей объектов. Его функциональность напрямую влияет на удобство работы пользователя и качество подготовки проектных данных. Таким образом, разработка модуля геометрического редактора является одной из приоритетных задач при создании отечественных САПР.

Цель работы – разработать прототип программного модуля САПР для создания и взаимодействия с трехмерными геометрическими моделями. Задачи работы: изучение функциональных возможностей ведущих зарубежных САПР (CST MWS [3], FEKO [4]); формирование перечня базовых и вспомогательных функций редактора; разработка архитектуры модуля и реализация базового функционала на языке C++ с использованием OpenCASCADE Technology (OCCT) [5] и Visualization Toolkit (VTK) [6]; создание алгоритма работы модуля с поддержкой истории операций.

Минимальные требования к функциональным возможностям модуля

На начальном этапе разработки рассматривались функциональные возможности студенческих версий ведущих коммерческих САПР: CST MWS и FEKO. Анализ работы геометрических ядер систем позволил сформировать ряд функций (разбитых на категории), которые должны быть включены в разрабатываемый модуль (таблица).

Выбранные функции охватывает базовые и вспомогательные операции, необходимые для созда-

ния и модификации трёхмерных геометрических моделей.

Перечень обязательных функций редактора

Категория	Функция
Примитивы	Создание геометрических моделей: куба, цилиндра, сферы, конуса, провода, трассы
Булевы функции	Объединение, вычитание, пересечение
Преобразования	Масштабирование, перемещение, вращение
Вспомогательные	Построение поверхности или тела по двум сечениям, выдавливание и вращение поверхности, снятие фаски, закругление края

Разработка основных функциональных возможностей модуля

В соответствии с выбранными функциями из таблицы разработан базовый набор инструментов построения и взаимодействия с трёхмерными геометрическими моделями. Реализация выполнена на языке программирования C++ с использованием библиотеки OCCT. Для отображения создаваемых геометрических объектов использована программная библиотека VTK. На рис. 1 представлены геометрические объекты, сформированные с использованием разработанного модуля, среди которых: куб, цилиндр, сфера, конус. На рис. 2 представлены булевы функции, среди которых: объединение, вычитание, пересечение.

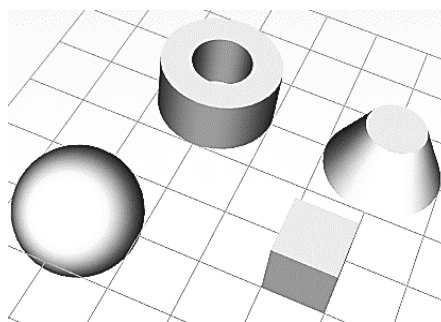


Рис. 1. Примеры геометрических объектов, созданных с использованием разработанного редактора

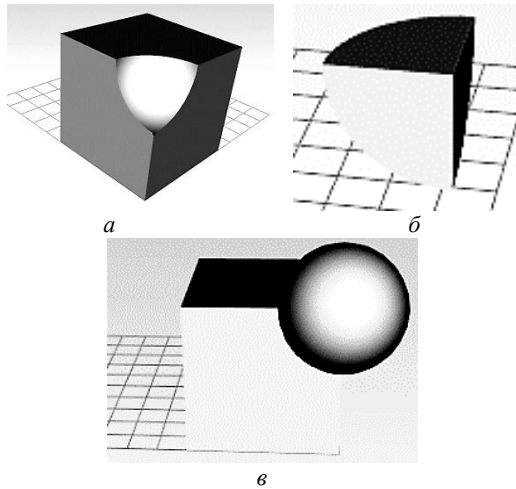


Рис. 2. Визуализация результата применения булевых функций, выполненных над геометрическими объектами в разработанном редакторе: вычитание – *а*; пересечение – *б*; объединение – *в*

Алгоритм работы и архитектура программного модуля

Алгоритм работы модуля показан на блок-схеме (рис. 3). На начальном этапе с использованием графического интерфейса пользователя (ГИП) выполняется ввод текстовых команд, таких как «CreateSphere(MySphere,PEC)», которые передаются в ядро модуля (без предварительного анализа, через вызов метода `run(commands)`).

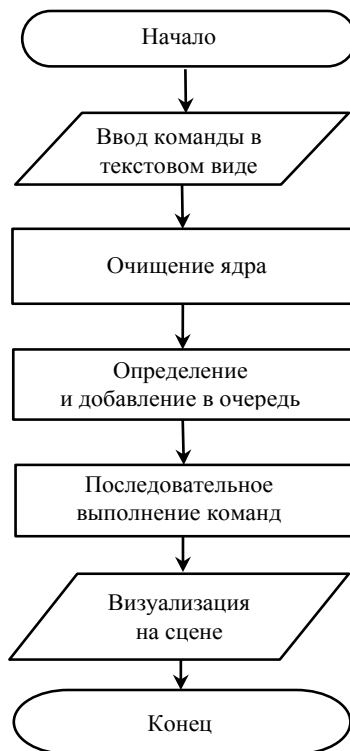


Рис. 3. Алгоритм работы модуля геометрического редактора

После получения команды ядро начинает ее обработку с очистки текущего состояния, удаляя все

данные (путём обнуления полей внутренней структуры, предназначенной для хранения данных). Далее запускается процесс парсинга посредством вызова метода `parseCommand()`, который анализирует строку, определяет тип операции по ключевому слову (например, `CreateSphere`) и создаёт соответствующий объект-команду, являющийся наследником абстрактного класса `Command`.

Получив строку параметров, команда разбирает её с помощью метода `setParameters()`, извлекая и сохраняя значения во внутренние поля. После обработки, если команда введена корректно, то происходит её запись в историю операций. После завершения парсинга всех команд ядро переходит к этапу обновления состояния модуля, вызывая метод `update()`. В рамках этого метода последовательно выполняются все созданные команды через вызов их метода `execute()`. В результате создается геометрический примитив и возвращается объект `TopoDS_Shape`, который сохраняется в структуре данных.

По завершении всех операций `Geometry core` передаёт актуальную структуру данных компоненту `Controller` (координатор взаимодействия между логикой и отображением). `Controller` перенаправляет информацию о трёхмерных объектах в компонент `Render scene`, отвечающий за визуализацию на сцене. Перед отображением новых данных `Render scene` очищает сцену от имеющихся на ней объектов, после чего отображает все элементы, содержащиеся в обновлённой структуре данных, обеспечивая согласованное состояние визуального представления.

Таким образом, вся система организована по принципу чёткого разделения ответственности между компонентами: ГИП отвечает за ввод команд, `Geometry core` – за их обработку и построение геометрии, `Controller` – за управление потоком данных, а `Render scene` за отображение результатов на сцене.

Архитектура прототипа программного модуля представлена на UML-диаграмме компонентов (рис. 4) [7].

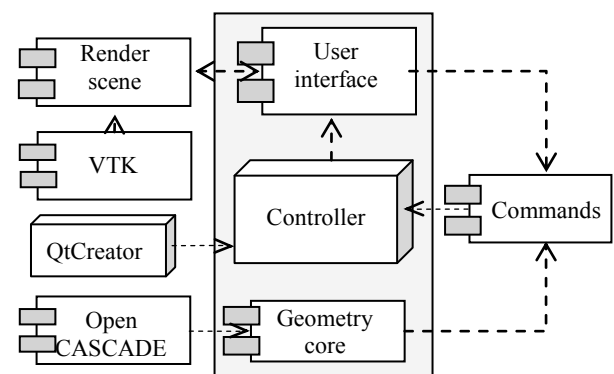


Рис. 4. Диаграмма компонентов разработанного прототипа программного модуля САПР

При реализации программной архитектуры редактора использованы следующие паттерны проектирования:

1. Паттерн «Команда» [8] – каждая операция инкапсулируется как объект команды, что позволяет унифицировать их хранение, выполнение и отмену.

2. Паттерн «История операций» (Command History) [8] – обеспечивает отмену и повторение действия.

Заключение

В ходе работы выполнен анализ ключевых функциональных возможностей геометрических редакторов зарубежных САПР CST MWS и FEKO. Разработан базовый функционал модуля геометрического редактора с поддержкой создания, модификации и визуализации трёхмерных объектов, а также предложен алгоритм его работы.

В дальнейшем планируется расширение функциональных возможностей модуля: импорт экспорт данных, превращение твердотельного в пустотелый объект (shell), интерактивный выбор точек, граней или поверхностей на сцене (picked), создание твердотельного объекта по сечениям (skinning).

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

1. Сапрсофт. САПР: что такое система автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr-soft.ru/stati/sapr-cto-takoe-sistema-avtomatizirovannogo-proektirovaniya>, свободный (дата обращения: 08.07.2025).

2. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Клюкин, Хасан А. Алхадж, А.Е. Максимов, А.В. Осин-

цев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 170–178.

3. Dassault Systemes. CST Microwave Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>, свободный (дата обращения: 12.07.2025).

4. Altair Engineering. FEKO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://altair.com/feko>, свободный (дата обращения: 12.07.2025).

5. OPEN CASCADE SAS. Open CASCADE Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.opencascade.com/content/latest-release>, (дата обращения: 16.07.2025).

6. VTK – the Visualization Toolkit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtk.org>, свободный (дата обращения: 16.07.2025).

7. Фаулер М. UML. Основы. – 3-е изд. / пер. с англ. А. Петухов. – СПб: Символ Плюс, 2004. – 192 с.

8. Швец А. Погружение в паттерны проектирования. – М.: БХВ-Петербург, 2021. – 320 с.

Фешуков Владислав Алексеевич

Студент каф. телевидения управления (ТУ)

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники

Эл. почта: vladislav.a.feshchukov@tusur.ru

Смирнов Сергей Владимирович

Ассистент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: sergei.v.smirnov@tusur.ru

Квасников Алексей Андреевич

Каед. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: aleksei.a.kvasnikov@tusur.ru

М.Е. Дорогов, В.В. Торопов, А.А. Иванов

Обзор библиотек для решения СЛАУ с разреженной матрицей в задачах на собственные значения

Выполнен обзор свободно распространяемых библиотек C++ для решения СЛАУ в задачах на собственные значения. Проведены анализ и сравнение их вычислительной эффективности. Для реализации решателя собственных мод фидерных СВЧ-трактов выбор остановлен на библиотеке Spectra, что обусловлено ее поддержкой работы с разреженными матрицами и функционалом по выбору количества вычисляемых собственных значений.

Ключевые слова: разреженные матрицы, C++, Eigen, Intel Math Kernel Library, Spectra.

Задачи на собственные значения встречаются в большом количестве областей. Они сводятся к решению СЛАУ вида $Ax = \lambda x$, где A – матрица коэффициентов, λ – собственное значение и x – собственный вектор. При этом такие матрицы имеют большую размерность и могут быть сильно разрежены. Подобные задачи целесообразно решать с применением компьютерных технологий и итерационных алгоритмов.

В настоящее время ведется активная разработка решателя собственных мод для фидерных СВЧ-трактов [1], основным ядром которого является математический аппарат решения СЛАУ с сильно разреженными матрицами. Поэтому один из ключевых факторов выбора инструмента решения СЛАУ – возможность его свободного использования в коммерческих продуктах.

Решать СЛАУ в задачах на собственные значения позволяет множество языков программирования. В данной работе выбран язык C++ из соображений его высокой производительности и гибкости [2]. Рассмотрены следующие библиотеки: Eigen [3], Intel Math Kernel Library (MKL) [4], Spectra [5], SuiteSparse [6], Blaze [7], Armadillo [8] и Anasazi [9]. Ключевыми критериями при выборе выступают скорость выполнения операций и объем занимаемой оперативной памяти.

Таким образом, целью данной работы является выполнение сравнительного анализа доступных библиотек на языке C++ и выбор оптимальной библиотеки для решения СЛАУ с разреженной матрицей в задачах на собственные значения.

Краткие сведения о библиотеках

Eigen – это высокопроизводительная шаблонная библиотека линейной алгебры для языка C++. С помощью данной библиотеки можно решать задачи на собственные значения. Однако эффективность её работы с большими разреженными матрицами ограничена.

Intel MKL – это высокооптимизированная математическая библиотека для научных и инженерных вычислений. Она предоставляет широкий набор математических функций. Для решения задач на собственные значения в ней используются модули BLAS и LAPACK, направленные на полное решение малых и средних плотных матриц. Важно отметить, что компания Intel завершила процесс выхода с рос-

сийского рынка, что ограничивает использование Intel MKL в коммерческих продуктах.

Spectra – библиотека на C++ для решения задач на собственные значения, основанная на идеях и подходах ARPACK. Она обеспечивает высокую эффективность при работе с большими разреженными матрицами и опирается на функциональность библиотеки Eigen. Использование Eigen обеспечивает интеграцию с высокопроизводительными методами решения СЛАУ, что делает Spectra удобным инструментом для задач большой размерности.

Также были рассмотрены библиотеки SuiteSparse, Blaze, Armadillo и Anasazi. Однако данные библиотеки не были включены в дальнейший обзор ввиду выявленных ошибок в процессе их практического применения.

Анализ и сравнение результатов

На рис. 1 представлена визуализация плотности матрицы размером 89×89 (малая). При расчетах также использовались матрицы с размерностями 4989×4989 (средняя) и 20796×20769 (большая).

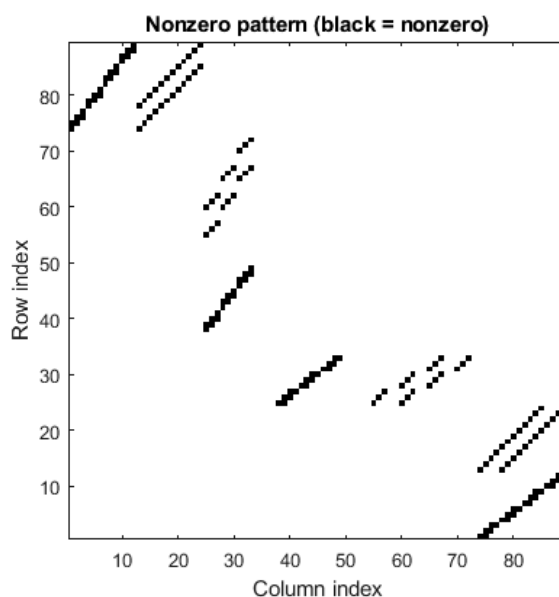


Рис. 1. Визуализация плотности матрицы малой размерности

Решение СЛАУ выполнено в среде Qt на системе с процессором Intel i7-12700 и объемом оперативной памяти 32 Гб. Для решения использовались

библиотеки Eigen, Intel MKL и Spectra. Оценка их вычислительной эффективности представлена в таблице.

Вычислительные затраты используемых библиотек

Библиотека	Число решений	Размер	Время	Память, Мб
Eigen	89	Малая	38 мс	1
Intel MKL	89	Малая	13 мс	7
	4 989	Средняя	51 017 мс	978
	20 769	Большая	1 ч	6723
Spectra	89	Малая	78 мс	< 1
	20	Средняя	3 517 мс	3
	20	Большая	33 598 мс	12

С учётом специфики используемых библиотек принято решение ограничивать количество найденных собственных значений. Вычисление полного спектра собственных значений для матриц среднего и большого размера с использованием библиотеки Spectra занимало несколько часов, поскольку данная библиотека не ориентирована на нахождение всех собственных решений. В то же время библиотека Intel MKL не позволяет задать число решений, что накладывает ограничение на размерность матрицы. В случае библиотеки Eigen расчёты удалось выполнить только для матрицы малой размерности, поскольку в ней не предусмотрена возможность работы с разреженными матрицами.

Из таблицы видно, что при решении СЛАУ с матрицей малой размерности Intel MKL затратила наименьшее количество времени. При этом минимальный объем оперативной памяти занимает Spectra. Ввиду особенностей анализируемых библиотек невозможно сравнить их вычислительную эффективность для матриц средней и большой размерностей.

Заключение

Выполнен обзор свободно распространяемых библиотек для решения СЛАУ в задачах на собственные значения. Проведены анализ и сравнение их вычислительной эффективности. В результате для последующего использования при разработке решателя собственных мод фидерных СВЧ-трактов была выбрана библиотека Spectra, поскольку в ней предусмотрена возможность работы с разреженными матрицами и выбора числа искоемых решений.

В дальнейшем планируется проведение более детального анализа эффективности библиотеки Spectra при решении задач на собственные значения

к реальным матрицам, сформированным методом конечных разностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-79-10165 (<https://rscf.ru/project/23-79-10165/>).

Литература

1. Toropov V.V. Finite-Element Based Eigenmode Analysis Algorithm for Standard Transmission Lines / V.V. Toropov, A.A. Kvasnikov // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2025.
2. Stroustrup B. The C++ Programming Language. – 4th Ed. / Addison-Wesley Professional. – 2013. – 1348 p.
3. Eigen C++ Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page, свободный (дата обращения: 16.07.2025).
4. Intel oneAPI Math Kernel Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/tools/oneapi/base-toolkit-download.html>, свободный (дата обращения: 18.07.2025).
5. Spectra – C++ Library For Large Scale Eigenvalue Problems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spectralib.org/quick-start>, свободный (дата обращения: 20.07.2025).
6. AldenMath – Mathematical software by Tim Davis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://suitesparse.com>, свободный (дата обращения: 21.07.2025).
7. Blaze [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bitbucket.org/blaze-lib/blaze>, свободный (дата обращения: 23.07.2025).
8. Armadillo: C++ library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arma.sourceforge.net/>, свободный (дата обращения: 25.07.2025).
9. Anasazi: A Block Eigensolvers Package [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.trilinos.org/dev/packages/anasazi/doc/html/index.html>, свободный (дата обращения: 27.07.2025).

Дорогов Максим Евгеньевич

Студент каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: m.dorogof@gmail.com

Торопов Владимир Валериевич

Инженер каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: vladimirtoropov516@gmail.com

Иванов Антон Андреевич

Доцент каф. ТУ ТУСУРа
Эл. почта: anton.ivn@tu.tusur.ru

Н.О. Шаталов, А.К. Нестеренко, В.П. Костелецкий

Разработка антенного полотна для активной фазированной решетки

Разработаны модели: антенного элемента для полотна активной фазированной решетки, на основе круглых патчей с коаксиальной запиткой антенных элементов; равноплечный делитель мощности и квадратурный делитель мощности. Элементы СВЧ-конструкции рассчитаны на рабочую частоту 2,4 ГГц с импедансом 50 Ом. Приведены результаты электродинамического моделирования.

Ключевые слова: электродинамическое моделирование, антенный элемент, делитель мощности, АФАР, круглый патч.

Высокоскоростная беспроводная связь является неотъемлемой частью современной электроники. В отличие от проводной сети, где устройство должно быть подключено физически, беспроводная сеть позволяет сохранять мобильность. Однако беспроводная сеть не обходится без устройств передачи информации, одним из основных компонентов которых является антенна [1].

Проблемами для использования многих антенн являются размеры и особенности производства. Встречаются крупногабаритные и сложные в производстве антенны, многоэлементные антенны, требующие точного позиционирования и настройки каждого элемента. Антенны работают в различных погодных условиях и подвержены ветровым нагрузкам, обледенению, перепадам температур [2].

Однако существует такой класс антенн, как патч-антенны, которые в большей степени позволяют решить эти проблемы. Такие антенны являются простыми и недорогими в производстве, а также их возможно производить в рамках типовых технологических процессов, используемых производителями печатных плат. Такая антенна обладает низким профилем, что позволяет интегрировать ее в корпус различных устройств. Обладая простой конструкцией, этот вид антенн имеет большую механическую прочность. Поэтому она удовлетворяет многим потребностям в разработке приемопередающих устройств [3, 4].

Активная фазированная антенная решетка (АФАР), разработанная на основе патч-антенн, способствует решению такого рода проблем. Такая конструкция позволяет управлять лучом, не изменяя геометрическое положение антенны в пространстве, что убирает механические элементы из конструкции и добавляет надёжности такому устройству [5]. Для проверки возможности управления лучом разработаны электродинамические модели равноплечного делителя мощности на 6 дБ, квадратурного делителя мощности на 3 дБ с разницей фаз на выходах 90° [6, 7]. Цель работы – разработка антенного элемента и полотна на его основе для проработки возможности управления лучом.

Антенный элемент

Центральная частота антенного элемента (АЭ) должна составлять 2,4 ГГц, входное сопротивление

50 Ом, КСВН не более 1,5. Для достижения требуемых характеристик в качестве материала диэлектрической подложки выбран фольгированный стеклотекстолит марки FR-4, толщина медной фольги $t = 0,035$ мм, толщина диэлектрика $h = 1,5$ мм, $\epsilon_r = 4,3$, $\Delta \tan = 0,025$. Параметры АЭ вычисляются в соответствии с соотношениями, показанными на рис. 1, длина волны λ определяется с учетом частоты сигнала и диэлектрической проницаемости ϵ_r подложки. Поскольку силовые линии поля АЭ распространяются не только в диэлектрике, а частично выходят за его пределы, используют значение эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эф}}$, которая вычисляется, как показано в [8].

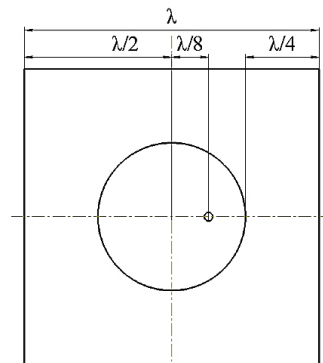


Рис. 1. Соотношение размеров АЭ

Выполнено электродинамическое моделирование, в ходе которого создана диэлектрическая подложка, на поверхности которой располагается плоский круглый элемент из меди, выполняющий роль излучателя, а с обратной стороны – медный экран. Параметры круглого патча: радиус $r = 33,13$ мм, толщина – 0,035 мм, расстояние от центра до точки запитки $d = 8,125$ мм. Параметры подложки: длина и ширина – 66,26 мм, толщина диэлектрика $h = 1,5$ мм. После расчетов параметров конструкции производится электродинамическое моделирование АЭ. Вычислены значения S_{11} , импеданса, коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), а также диаграмма направленности (ДН) антенны. На рис. 2 приведена частотная зависимость S_{11} .

На рабочей частоте 2,4 ГГц S_{11} равен –14 дБ, что говорит о хорошем согласовании, большая часть мощности излучается АЭ. На рис. 3 представлена частотная зависимость КСВН.

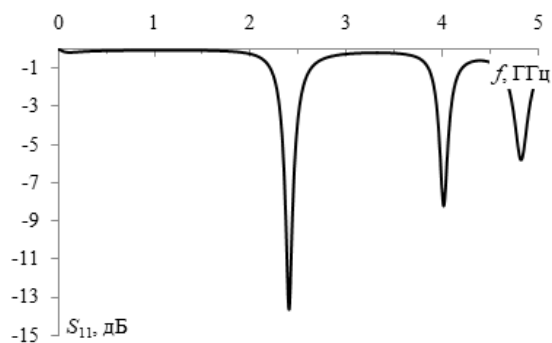
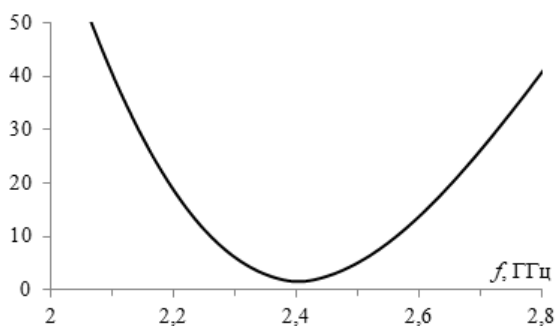
Рис. 2. Частотная зависимость S_{11} АЭ

Рис. 3. Частотная зависимость КСВН АЭ

Круглый патч на частоте 2,4 ГГц обладает КСВН = 1,3. Такой уровень согласования считается приемлемым для большого числа задач. На рис. 4 представлена ДН АЭ.

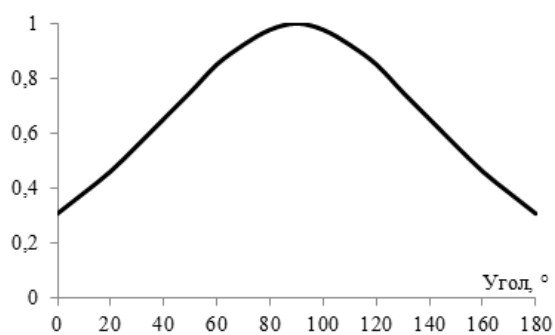


Рис. 4. Нормированная ДН АЭ

Из ДН можно сделать вывод, что основной луч направлен перпендикулярно плоскости антенны. Боковые лепестки не наблюдаются. Большая часть сигнала направлена в заданную сторону. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ составляет $87,6^\circ$.

Равноплечный делитель мощности

Равноплечный делитель мощности представляет круглую печатную плату с размещенными на ней тремя разъемами типа SMA. Для достижения одинаковой выходной мощности на двух выходах делителя разъемы размещаются на равном удалении друг от друга, угол между ними при этом составляет 120° . На рис. 5 представлена схема расположения разъемов данного делителя. В качестве диэлектрической подложки выбран стеклотекстолит марки FR-4 толщиной 1,5 мм.

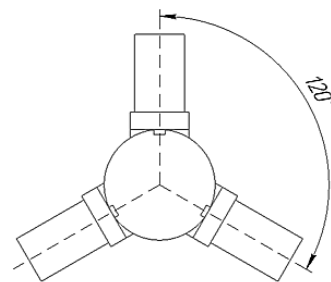
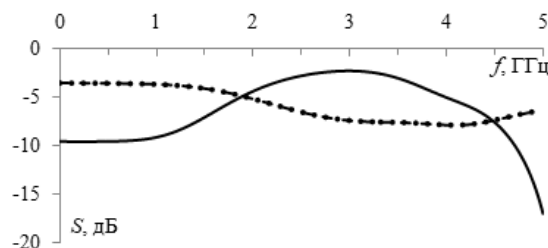


Рис. 5. Чертеж делителя мощности

Диаметр центральной площадки равноплечного делителя мощности равен 12 мм. Разработана его электродинамическая модель, вычислены значения S-параметров и разбег фаз на выходах делителя. На рис. 6 показаны S_{11} , S_{21} и S_{31} .

Рис. 6. Частотные зависимости: S_{11} (—), S_{21} (---) и S_{31} (· · · ·)

На рабочей частоте 2,4 ГГц S_{21} и S_{31} составляют $-6,3$ дБ. Так как делитель симметричен, то мощность из порта 1 делится поровну между портами 2 и 3. Их идентичные графики подтверждают равномерное деление. Фазы сигналов на выходах 2 и 3 одинаковы и на графиках не показаны.

Квадратурный делитель мощности

Для смещения фазы на 90° использован квадратурный делитель мощности [9, 10]. Он позволяет достичь такого результата, создавая разность электрических длин путей, по которым проходит сигнал. На рисунке 8 представлена схема квадратурного делителя. Параметры квадратурного делителя мощности: рабочая частота 2,4 ГГц, импеданс линии $Z_0 = 50$ Ом, материал подложки FR-4 и $h = 1,5$ мм.

Делитель состоит из 4 отводов с импедансом 50 Ом и центральной части, верхний и нижний полоски которой равны $Z_1 = Z_0/\sqrt{2} = 35,35$ Ом, а боковые — $Z_0 = 50$ Ом, $\lambda = 60,24$ мм, $W_0 = 2,9$ мм, $W_1 = 5$ мм. На рис. 7 показана схема такого делителя мощности.

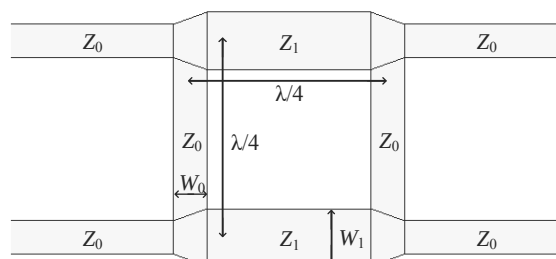


Рис. 7. Схема квадратурного делителя мощности

С помощью разработанной электродинамической модели квадратурного делителя мощности вы-

числены значения S -параметров и фаз на его выходах. На рис. 8 показаны S_{11} , S_{21} , S_{31} и S_{41} .

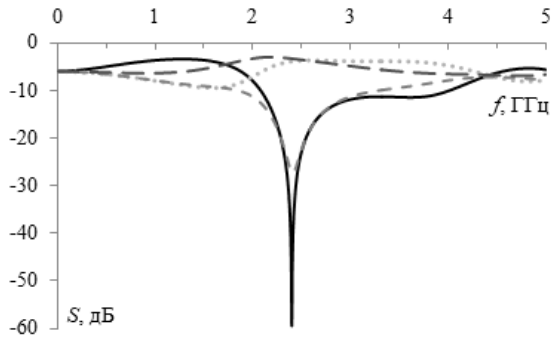


Рис. 8. Частотные зависимости:
 S_{11} (—), S_{21} (····), S_{31} (---) и S_{41} (- - -)

На рабочей частоте 2,4 ГГц $S_{11} = -59,5$ дБ, что свидетельствует о хорошем согласовании. Передача мощности на выходные порты характеризуется значениями $S_{21} = -3,9$ дБ и $S_{41} = -3,4$ дБ. Мощность, переданная в порт 3, $S_{31} = -27,2$ дБ, крайне мала, что подтверждает хорошую изоляцию. На рис. 9 представлены фазы на выходных портах (порты 2 и 4) квадратного делителя мощности.

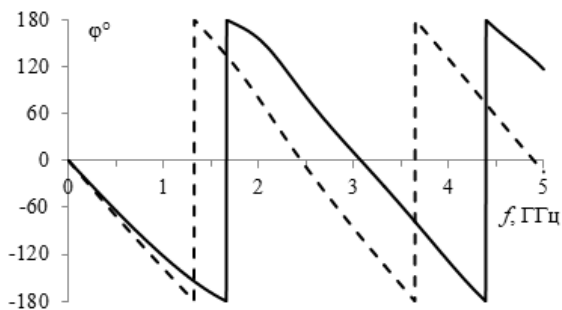


Рис. 9. Частотная зависимость фаз сигнала на 2-м (—) и 4-м (---) портах

На частоте 2,4 ГГц разность фаз составляет $89,1^\circ$, отклонение в $0,9^\circ$ обусловлено погрешностями геометрии разработанной модели и условий моделирования.

Полотно антенных элементов

Полотно включает в себя 4 АЭ, образующие массив 2×2 элемента. Чертеж полотна АЭ показан на рис. 10.

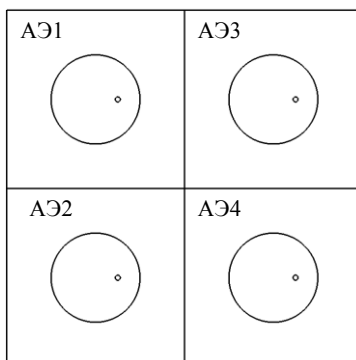


Рис. 10. Чертеж полотна АЭ

Схема подключения компонентов для проверки возможности электронного отклонения главного лепестка (луча) ДН показана на рис. 11.

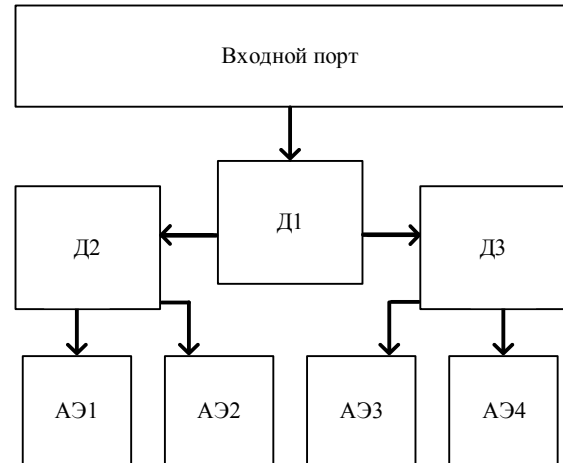


Рис. 11. Схема подключения компонентов

Для формирования ДН без отклонения луча, в соответствии с рис. 11, используются равноплечные делители мощности Д1, Д2 и Д3. Для формирования ДН с отклонением луча в качестве Д2, Д3 выбраны равноплечные делители мощности, а Д1 – квадратурный делитель мощности. Далее создается электродинамическая модель полотна АЭ, проверяется работа в двух режимах: без изменения фазы и с изменением фазы сигнала на 90° . В первом случае на все АЭ подается одинаковая фаза сигнала, во втором случае на АЭ1 и АЭ2 $\varphi = 0$, а АЭ3 и АЭ4 $\varphi = 90$, что и приводит к отклонению луча ДН. На рис. 12 показаны нормированные ДН полотна АЭ с отклонением главного лепестка и без.

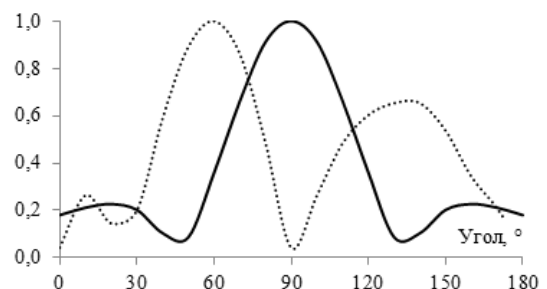


Рис. 12. Нормированные ДН при разности фаз сигнала
 $\varphi = 0^\circ$ (—), $\varphi = 90^\circ$ (····)

В первом случае отчетливо виден главный лепесток, расположенный перпендикулярно плоскости полотна. Также отмечается низкий уровень боковых лепестков. Во втором случае видно, что главный лепесток сместился на 30° относительно нормали, а также появился боковой лепесток значительно меньшей амплитуды.

Заключение

В данной работе приведены результаты электродинамического моделирования: АЭ (КСНВ = 1,3, $S_{11} = -14$ дБ, ДН); равноплечного делителя мощности ($S_{11} = S_{31} = -6,3$ дБ, $\Delta\varphi = 0^\circ$); квадратурного де-

лителя мощности ($S_{21} = -3,9$ дБ и $S_{41} = -3,4$ дБ, $\Delta\varphi = 89,1^\circ$); полотна АЭ (ДН двух случаев). Разработанные компьютерные модели рассчитаны на рабочую частоту 2,4 ГГц и импеданс 50 Ом. Результаты электродинамического моделирования показали, что электронное управление лучом полотна АЭ на основе круглого патча возможно. В дальнейшем планируется доработка АЭ и разработка на его основе полотна АЭ с улучшенными характеристиками, состоящего из большего количества элементов, что позволит добиться увеличения разрешающей способности.

Исследование выполнено в рамках проекта Пр2030-МОН наука/СТП1/Б/19.

Литература

1. Виноградов А.Ю. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны: учеб. пособие / А.Ю. Виноградов, Р.В. Кабатов, А.М. Сомов; под ред. А.М. Сомова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012. – 443 с.
2. Устройства СВЧ и антенны: учеб. для вузов / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
3. Narbudowicz A. Low-Cost Multimode Patch Antenna for Dual MIMO and Enhanced Localization Use / A. Narbudowicz, M.J. Ammann // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Jan. 2018. – Vol. 66, No. 1. – P. 405–408.
4. Ahire D.D. Kharate Corner rounded UWB monopole rectangular microstrip patch antenna / D.D. Ahire, G.K. Kharate // 2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC). – Aurangabad, India, 2017. – P. 1–2.
5. Androsov A.A. Active phased array antenna (АРАА) / A.A. Androsov, I.N. Karmanov // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – № 9. – P. 153–157.
6. Конин В.В. Полосковые делители мощности СВЧ // Проектирование фазированных антенных решёток / под ред. Д.И. Воскресенского. – 4-е изд. – М.: Радиотехника, 2012. – С. 587–619.
7. Неганов В.А. Устройства СВЧ и антенны: учеб. / В.А. Неганов, Д.С. Ключев, Д.П. Табаков. – Изд. стер. – М.: URSS: Ленанд, 2016.
8. A Novel Omnidirectional Circularly Polarized Pagoda Antenna with Four Shorting Pins for UAV Applications / Zheyu Li, Yongzhong Zhu, Yu Shen, Xiaoyu Liu, Guohao Peng // ACES Journal. – Feb. 2020. – Vol. 35, No. 2. – P. 201–209.
9. Меледин К.И. Проектирование квадратурного делителя мощности в среде ADS // Радиотехника и электроника: 55-я юбилейная науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. – Минск: Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, 2019. – С. 116–117.
10. Velidi V.K. Improved bandwidth via-free lumped-element quadrature hybrid couplers / V.K. Velidi, A.V.G. Subramanyam, V.V. Srinivasan // 2014 IEEE International Microwave and RF Conference (IMaRC). – Bangalore, India, 2014. – P. 229–232.

Шаталов Никита Олегович

Техник НИЛ «ФИЭМС» Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: nikita.shatalov.06@mail.ru

Нестеренко Алексей Константинович

Инженер НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа
Эл. почта: alex27.11.01@mail.ru

Костелецкий Валерий Павлович

Ст. науч. сотр. НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа
Эл. почта: cyanogendone@gmail.com

В.Д. Нгуен

Влияние асимметрии матриц погонных параметров асимметричной тестовой цепи электропитания на отклик на воздействие сверхкороткого импульса по корпусной земле

Анализировалось влияние асимметрии матриц погонных коэффициентов электромагнитной (L) и электростатической (C) индукций. Для этого получены временные отклики при асимметричных и симметризованных матрицах. Асимметрия L (до 0,26%) и C (до 15,8%) изменила напряжения в узлах максимум на 0,45%, а разности напряжений – 0,03%. Таким образом, для получения симметричных матриц уменьшение длины сегмента не требуется; напротив, её можно увеличить для снижения вычислительных затрат.

Ключевые слова: асимметричные матрицы, временной отклик, квазистатический анализ, корпусная земля, сверхкороткий импульс.

Воздействие сверхкоротких импульсных помех (СКИ) на корпусную землю цепи электропитания для оценки их опасности рассматривается крайне редко. В частности, предложено рассмотреть структуру тестового примера цепи электропитания, при этом корпус, доступный для воздействия СКИ, рассматривается как проводник, связанный с данной цепью [1]. Приведены формы напряжений в моделируемой схеме для симметричных [2] и асимметричных [3] структур. Однако отклик вычислялся с использованием матриц L и C , которые на практике оказались асимметричными. Между тем теоретически эти матрицы должны быть симметричными, и их асимметрия может повлиять на корректность вычисленного отклика. Следовательно, необходимо симметризовать матрицы, вычислить с ними отклик и сравнить результаты с предыдущими, используя три значения длины сегментов. Цель данной работы – выполнить указанную проверку.

Для анализа была использована структура из работы [3] (рис. 1). Асимметричные и симметризованные матрицы, а также соответствующие матрицы асимметрии, вычисленные в системе TUSUR.EMC, приведены в табл. 1–3 для длины сегмента 7 мкм, в табл. 4–6 – для длины сегмента 12 мкм и в табл. 7–9 – для длины сегмента 17 мкм. Как видно, максимальная асимметрия для матриц L мала (0,26%), тогда как для матриц C она значительна и достигает 15,8% в случае 3.

Схема и параметры моделирования взяты из [2].



Рис. 1. Поперечное сечение асимметричной тестовой структуры

Таблица 1
Асимметричные матрицы L и C при длине сегмента 7 мкм

L , Гн/м	3,69446057e-07	1,34982452e-07	4,70703314e-08
	1,34979712e-07	3,50454432e-07	3,50487671e-08
	4,71163672e-08	3,50950219e-08	2,06030804e-07
C , Ф/м	9,75378780e-11	-2,60838002e-11	-5,84628510e-12
	-2,60716063e-11	1,14525139e-10	-2,82215156e-12
	-5,77710718e-12	-2,42956443e-12	5,84286333e-11

Таблица 2

Симметризованные матрицы L и C
при длине сегмента 7 мкм

L , Гн/м	3,69446057e-07	1,34981082e-07	4,70933493e-08
	1,34981082e-07	3,50454432e-07	3,50718945e-08
	4,70933493e-08	3,50718945e-08	2,06030804e-07
C , Ф/м	9,75378780e-11	-2,60777032e-11	-5,81169614e-12
	-2,60777032e-11	1,14525139e-10	-2,62585800e-12
	-5,81169614e-12	-2,62585800e-12	5,84286333e-11

Таблица 3

Матрицы асимметрии L и C при длине сегмента
7 мкм, %

L	0	0,001	0,05
	0,001	0	0,066
	0,05	0,066	0
C	0	0,023	0,6
	0,023	0	7,5
	0,6	7,5	0

Таблица 4

Исходные матрицы L и C при длине сегмента 12 мкм

L , Гн/м	3,69848341e-07	1,34894579e-07	4,70775071e-08
	1,34887144e-07	3,50807066e-07	3,50171265e-08
	4,71459415e-08	3,51005554e-08	2,06069570e-07
C , Ф/м	9,71965053e-11	-2,57457706e-11	-6,15130284e-12
	-2,57426527e-11	1,13911713e-10	-3,11691691e-12
	-5,73668883e-12	-2,26546521e-12	5,93090411e-11

Таблица 5

Симметризованные матрицы L и C
при длине сегмента 12 мкм

L , Гн/м	3,69848341e-07	1,34890862e-07	4,71117243e-08
	1,34890862e-07	3,50807066e-07	3,50171265e-08
	4,71117243e-08	3,50588409e-08	2,06069570e-07
C , Ф/м	9,71965053e-11	-2,57442117e-11	-5,94399584e-12
	-2,57442117e-11	1,13911713e-10	-3,11691691e-12
	-5,94399584e-12	-2,69119106e-12	5,93090411e-11

Таблица 6

Матрицы асимметрии L и C
при длине сегмента 12 мкм, %

L	0	0,003	0,073
	0,003	0	0,119
	0,073	0,119	0
C	0	0,006	3,488
	0,006	0	15,819
	3,488	15,819	0

Таблица 7

Исходные матрицы L и C при длине сегмента 17 мкм			
L, Гн/м	3,70320633e-07	1,34767491e-07	4,69710152e-08
	1,34759439e-07	3,51232295e-07	3,49147485e-08
	4,71718079e-08	3,50992811e-08	2,06067441e-07
C, Ф/м	9,70651196e-11	-2,55898887e-11	-5,26769848e-12
	-2,55343559e-11	1,13568160e-10	-2,21772139e-12
	-5,76639093e-12	-2,15468316e-12	5,71565933e-11

Таблица 8

Симметризованные матрицы L и C при длине сегмента 17 мкм			
L, Гн/м	3,70320633e-07	1,34763465e-07	4,70714115e-08
	1,34763465e-07	3,51232295e-07	3,50070148e-08
	4,70714115e-08	3,50070148e-08	2,06067441e-07
C, Ф/м	9,70651196e-11	-2,55621223e-11	-5,51704471e-12
	-2,55621223e-11	1,13568160e-10	-2,18620228e-12
	-5,51704471e-12	-2,18620228e-12	5,71565933e-11

Таблица 9

Матрицы асимметрии L и C при длине сегмента 17 мкм, %			
L	0	0,003	0,21
	0,003	0	0,26
	0,21	0,26	0
C	0	0,1	4,52
	0,1	0	1,44
	4,52	1,44	0

Временные отклики на воздействие СКИ также вычислялись в программе TUSUR.EMC. Результаты откликов для каждого случая в рамках данной работы не приводятся. Разности форм напряжений для асимметричных и симметризованных матриц для каждого узла представлены на рис. 2, а разности разностей между узлами в начале и конце линии – на рис. 3 для длины сегмента 7 мкм; на рис. 4 и 5 – для длины сегмента 12 мкм; на рис. 6 и 7 – для длины сегмента 17 мкм. Как видно, асимметрия матриц L и C изменяет напряжения в узлах до 2,26 В (0,45%), а их разности – лишь 132 мВ (0,03%). Поскольку влияние асимметрии невелико, дополнительное увеличение сегментации для получения симметричных матриц не требуется.

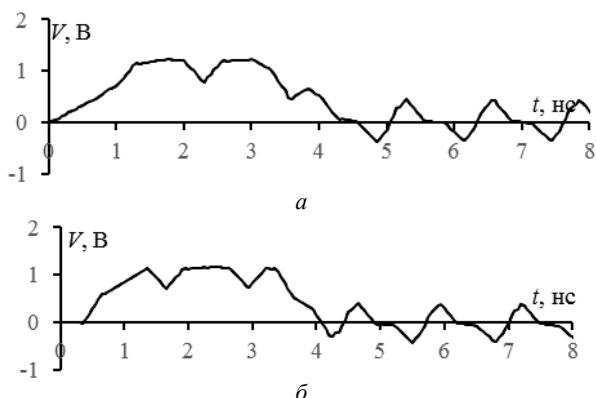


Рис. 2. Разности форм напряжения для асимметричных и симметризованных матриц L и C в узлах V1 (–) и V3 (– –) (а), в узлах V2 (–) и V4 (– –) (б) при длине сегмента 7 мкм

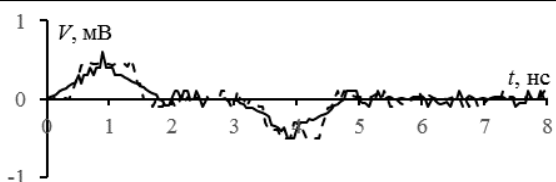


Рис. 3. Разности разностей форм напряжения между узлами V1 и V3 (–), V2 и V4 (– –) для асимметричных и симметризованных матриц L и C при длине сегмента 7 мкм

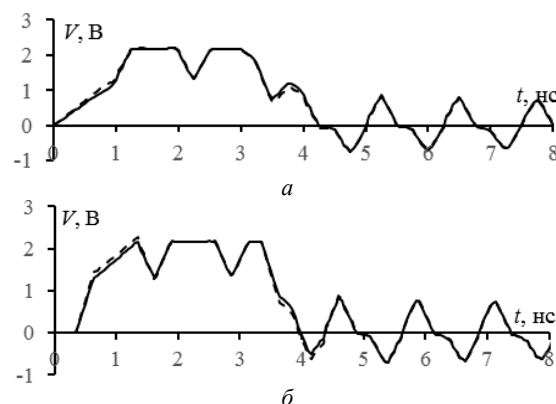


Рис. 4. Разности форм напряжения для асимметричных и симметризованных матриц L и C в узлах V1 (–) и V3 (– –) (а), в узлах V2 (–) и V4 (– –) (б) при длине сегмента 12 мкм

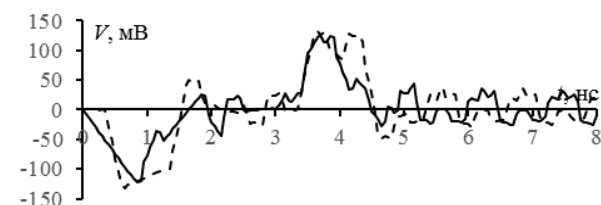


Рис. 5. Разности разностей форм напряжения между узлами V1 и V3 (–), V2 и V4 (– –) для асимметричных и симметризованных матриц L и C при длине сегмента 12 мкм

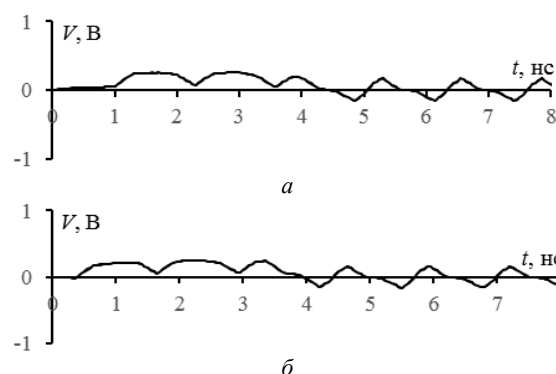


Рис. 6. Разности форм напряжения для асимметричных и симметризованных матриц L и C в узлах V1 (–) и V3 (– –) (а), в узлах V2 (–) и V4 (– –) (б) при длине сегмента 17 мкм

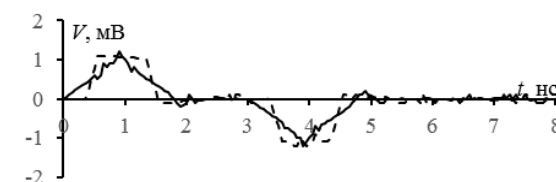


Рис. 7. Разности разностей форм напряжения между узлами V1 и V3 (–), V2 и V4 (– –) для асимметричных и симметризованных матриц L и C при длине сегмента 17 мкм

Таким образом, рассмотрена структура с асимметричным расположением проводников, на основе которой был проведён анализ влияния асимметрии матриц **L** и **C**. Показано, что асимметрия матриц **L** (до 0,26%) и **C** (до 15,8%) оказывает незначительное влияние на напряжения в узлах (до 1,26%) и их разности (до 0,03%). Следовательно, дополнительное увеличение частоты сегментации для обеспечения симметричности матриц не требуется. Более того, возможно рассмотреть использование менее частой сегментации для снижения вычислительных затрат. Однако аналогичный анализ необходимо провести для других вариантов асимметрии тестовой цепи.

Исследование выполнено в ТУСУРе за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00579, <https://rscf.ru/project/24-29-00579/>.

Литература

1. Gazizov T.R. Complex analysis of IEMI in grounding circuits of critical equipment: preliminary results / T.R. Gazizov, V.D. Nguyen, A.A. Hasan // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Sochi, Russian Federation. – 20–24 May, 2024. – P. 413–417.

2. Нгуен В.Д. Временные отклики тестовой цепи электропитания на воздействие сверхкороткого импульса по корпусной земле // XXX Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-30–2024)». – 19 ноября, 2024. – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 130–135.

3. Нгуен В.Д. Временной отклик асимметричной цепи электропитания на воздействие сверхкороткого импульса по корпусной земле // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2025», Томск, 21–23 мая, 2025 г.: в 3 ч. – Томск: ТУСУР; В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Т. 3. – С. 32–36.

4. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: ТГУ, 2007. – 152 с.

Нгуен Ван Донг

Аспирант каф. телевидения и управления
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники
Эл. почта: thanhxuancuatoi1994@gmail.com

В.С. Чебанов, В.А. Семенюк

Методика применения дипольного приближения для излучаемой помехоэмиссии, измеренной методом поверхностного сканирования в ближней зоне

Представлена методика применения дипольного приближения для излучаемой помехоэмиссии, измеренной методом поверхностного сканирования в ближней зоне. Приведена принципиальная схема установки для измерения уровня помехоэмиссии и проведена апробация представленной методики. Собрана установка для измерения излучаемой помехоэмиссии, для которой в качестве исследуемого объекта использовалась микрополосковая линия. Максимальное значение абсолютного отклонения измеренных и вычисленных из дипольных моментов амплитуд напряженности магнитного поля составило 28 фА/м.

Ключевые слова: ближняя зона, дипольный момент, печатная плата, электромагнитная совместимость, эквивалентные источники излучения, излучаемая помехоэмиссия.

Важным этапом при проектировании радиоэлектронных устройств (РЭУ) является разработка печатных плат (ПП), которая для современных РЭУ достаточно сложна и требует множества различных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Измерение уровня излучаемой электромагнитной эмиссии (помехоэмиссии) РЭУ проводят, используя безэховые или реверберационные камеры, а также устройства на основе ТЕМ-камер и линий передачи.

Альтернативным видом измерения является измерение поля в ближней зоне с использованием метода поверхностного сканирования, используя который, можно быстро оценить уровень излучаемой помехоэмиссии. На основе измеренного уровня помехоэмиссии ПП РЭУ, используя методики из [1, 2], могут быть получены карты распределения и выявлены области с наибольшим значением плотности тока, что позволит разработчикам скорректировать компоновку и трассировку ПП РЭУ. Используя измерения в ближней зоне, может быть вычислено, аналогично [3], излучение от исследуемого объекта (ИО) в дальней зоне. Так как каждый источник излучения может быть представлен набором диполей [4], то в большинстве случаев исходный источник излучения может быть заменен на эквивалентную дипольную модель, содержащую электрические и/или магнитные диполи, излучение которых соответствует реальному излучению ИО.

Использование эквивалентных дипольных моделей применимо в моделировании источников излучения [5–8], где они вычислены из измеренных в ближней зоне электрических и/или магнитных полей [9, 10]. Таким образом, применение данных моделей позволит использовать результаты измерения в моделировании для проведения анализа ЭМС РЭУ ПП.

Цель работы – реализовать варианты применения дипольного приближения для излучаемой помехоэмиссии, измеренной методом поверхностного сканирования в ближней зоне.

Дипольное приближение источников излучения

Задача вычисления эквивалентной дипольной модели сводится к измерению излучаемой поме-

хоэмиссии ИО и вычислению её дипольных моментов. Измеренное электромагнитное поле используется для определения параметров дипольных моментов, которыми описывается излучение ИО. В декартовой системе координат любой произвольный электрически малый источник может быть заменён шестью диполями, используя дипольное приближение мультипольного разложения (представление электромагнитного излучения ИО как суперпозиции электромагнитного излучения от набора элементарных диполей) [1]. Векторы электрического и магнитного дипольных моментов определяются как

$$\mathbf{P} = \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{v}', \quad \mathbf{M} = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{r}' \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{v}', \quad (1)$$

где $\mathbf{J}$ – плотность тока, распределенного по объему V , $\mathbf{r}'$ – вектор, определяющий расположение точки наблюдения.

Источник излучения заменяется тремя электрическими и магнитными дипольными моментами вдоль направлений x , y , z , которые обозначаются как P_x , P_y , P_z и M_x , M_y , M_z соответственно [4]. Суперпозиции электромагнитных полей, генерируемых набором дипольных моментов, эквивалентны полям реального источника излучения [12]. Учёт граничных условий идеального проводника позволяет уменьшить количество дипольных моментов, что упрощает решение задачи. Это связано с тем, что в подавляющем большинстве практических случаев источник излучения имеет размеры, намного меньшие по сравнению с плоскостью земли, которая может рассматриваться в простейшем случае как идеальный проводник.

Согласно методу изображений [13], излучение от электрических P_x , P_y и магнитного M_z дипольных моментов почти полностью подавляется из-за взаимодействия с их отражёнными копиями, поскольку последние ориентированы противоположно оригиналам. При этом дипольные моменты P_z и M_x , M_y остаются, так как их изображения усиливают поля оригиналов, поскольку направлены в ту же сторону [13]. В результате для вычисления дипольных моментов вблизи плоскости идеального проводника

достаточно измерить лишь тангенциальные компоненты магнитного поля ИО.

Методика дипольного приближения измеренного уровня помехоэмиссии в ближней зоне в эквивалентные источники излучения

На основе рассмотренных подходов вычисления дипольных моментов и учёта граничных условий разработана методика дипольного приближения измеренного уровня помехоэмиссии в ближней зоне в эквивалентные источники излучения. Методика основана на измерении тангенциальных компонент магнитного поля и вычисления из них дипольных моментов. Изначально последовательно перемещается зонд в локальные точки области измерения, и измеряется напряженность поля. Измеренные данные записываются в систему сбора данных, фиксируя положения зонда и измеренное значение. По измеренным значениям вычисляются значения дипольных моментов P_z , M_x , M_y путем решения обратной задачи, используя метод наименьших квадратов и усечённое сингулярное разложение [14].

Сбор данных проводится, используя установку для измерения уровня помехоэмиссии от ИО (рис. 1), содержащей систему позиционирования, измерительный приёмник, системы управления и сбора данных и зонд.



Рис. 1. Структурная схема установки для измерения уровня помехоэмиссии от ИО

Магнитные M_x , M_y и электрические P_z дипольные моменты можно вычислить из измеренных в ближней зоне тангенциальных (к поверхности ИО) компонент магнитного поля H_x и H_y как

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} P_z \\ M_y \\ M_x \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\mathbf{T}$ – матрица, связывающая дипольные моменты с напряженностью измеренного магнитного поля.

Каждый элемент матрицы $\mathbf{T}$ описывает вклад конкретного дипольного момента в конкретную компоненту поля в локальной точке измерения. Компоненты матрицы $\mathbf{T}$ можно найти как [4]

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{H_x P_z} & T_{H_x M_x} & T_{H_x M_y} \\ T_{H_y P_z} & T_{H_y M_x} & T_{H_y M_y} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В результате для вычисления дипольных моментов из измеренного магнитного поля в ближней зоне требуется решить уравнение (2). Для решения данной обратной задачи применен метод наименьших квадратов. При этом предварительно требуется выполнить нормировку результатов измерений как

$$\mathbf{F}_n = \begin{pmatrix} H_x / H_{\max} \\ H_y / H_{\max} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $H_{\max}$ – максимальное значение напряженности поля среди составляющих H_y и H_x .

Также необходимо нормировать искомые эквивалентные дипольные моменты как

$$\mathbf{X}_k = \begin{pmatrix} P_z \\ k_0 M_x \\ k_0 M_y \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Данный подход позволяет повысить обусловленность матрицы $\mathbf{T}$ и увеличить точность решения обратной задачи методом наименьших квадратов.

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{T}_{nk} \mathbf{X}_k, \quad (6)$$

где $\mathbf{T}_{nk}$ определяется как

$$\mathbf{T}_{nk} = \begin{pmatrix} T_{H_x P_z} / H_{\max} & T_{H_x M_x} / (H_{\max} k_0) & T_{H_x M_y} / (H_{\max} k_0) \\ T_{H_y P_z} / H_{\max} & T_{H_y M_x} / (H_{\max} k_0) & T_{H_y M_y} / (H_{\max} k_0) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для устранения нефизичности дипольных моментов, ослабления помех и минимизации ошибок используется метод регуляризации, а именно усечённое сингулярное разложение, что приводит к тому, что матрица $\mathbf{T}_{nk}$ записывается как

$$\mathbf{T}_{nk} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}', \quad (8)$$

где $\mathbf{V}$ и $\mathbf{U}$ – унитарные матрицы размерами $n \times n$ и $k \times k$ соответственно.

В результате решения обратной задачи для каждой пространственной точки получены дипольные моменты P_z , M_x и M_y .

Апробация дипольного приближения измеренного уровня помехоэмиссии в ближней зоне в эквивалентные источники излучения

Для апробации дипольного приближения измеренного уровня помехоэмиссии в ближней зоне в эквивалентные источники излучения собрана измерительная установка (рис. 2). Для измерения амплитуды напряженности магнитного поля использовался измерительный петлевой зонд и измерительный приёмник Rohde&Schwarz ESPR 7.

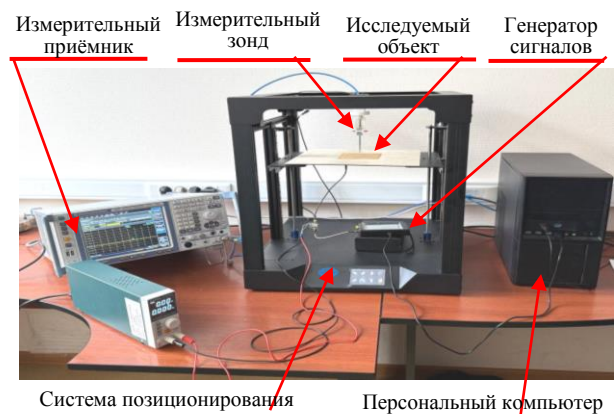


Рис. 2. Измерительная установка для измерения уровня излучаемой помехоэмиссии

В качестве ИО для апробации предложенной методики выбраны микрополосковая линия переда-

чи (МЛП), так как широко применяется в различных ВЧ- и СВЧ-устройствах, а также на ПП РЭУ. К одному из концов МЛП подключалась согласованная нагрузка ($Z_n = 50 \text{ Ом}$), а к другому – генератор сигналов, на выходе которого формировался синусоидальный сигнал мощностью 0 дБм. Измерения излучаемых помехоэмиссий для ЛП проводились на частоте 100 МГц.

Далее, используя метод наименьших квадратов и усечённое сингулярное разложение, вычислялись дипольные моменты P_z , M_x и M_y . Для подтверждения достоверности полученных результатов из рассчитанных дипольных моментов P_z , M_x и M_y вычислены напряжённости магнитного поля H_x и H_y . Измеренные компоненты магнитного поля H_x и H_y от МЛП представлены на рис. 3.

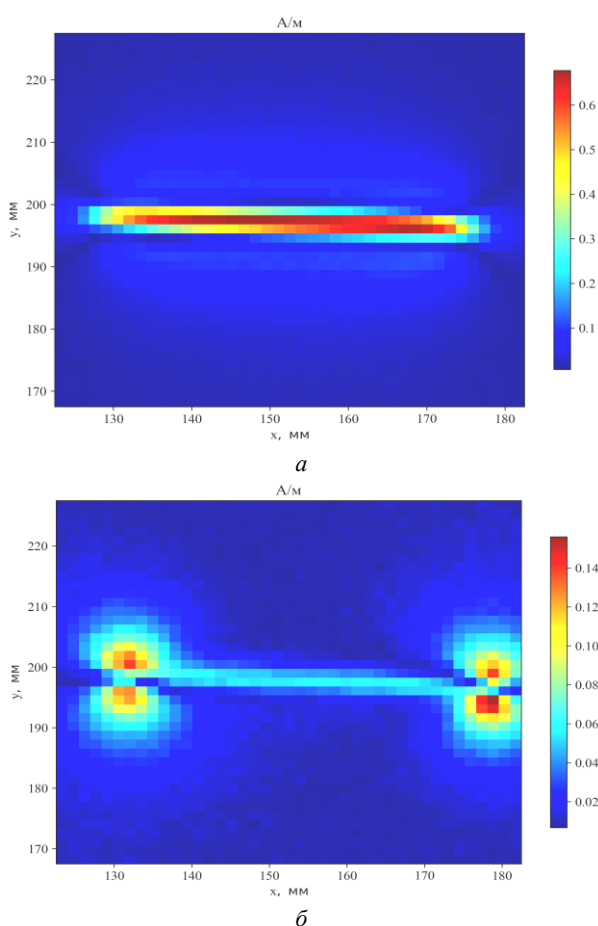


Рис. 3. Измеренные картины полей H_x (а) и H_y (б) МЛП

На основе измеренных компонент магнитного поля H_x и H_y , вычислены электрические и магнитные дипольные моменты P_z , M_x и M_y (рис. 4). Вычисленные напряжённости магнитного поля из дипольных моментов представлены на рис. 5.

Выводы

Выполнена валидация методики дипольного приближения измеренной помехоэмиссии в ближней зоне в эквивалентные источники излучения. В качестве ИО выбрана МЛП, компоненты магнитного поля которой измерялись с использованием разрабо-

танной установки, содержащей систему позиционирования магнитного зонда.

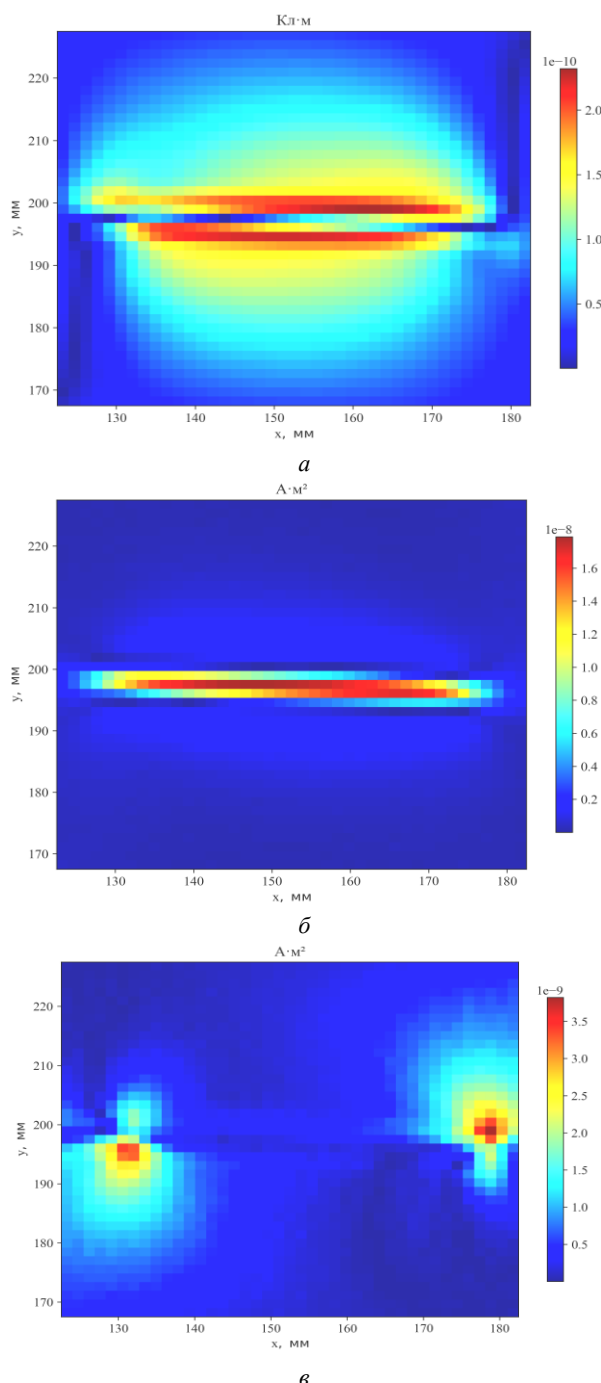


Рис. 4. Вычисленные дипольные моменты P_z (а), M_x (б) и M_y (в) для МЛП

На основе измеренных значений напряжённости магнитного поля выполнены расчеты дипольных моментов, из которых вычислены напряжённости магнитных полей. Абсолютное отклонение измеренных и вычисленных из дипольных моментов амплитуд напряжённости магнитного поля составило 28 фА/м.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект №23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

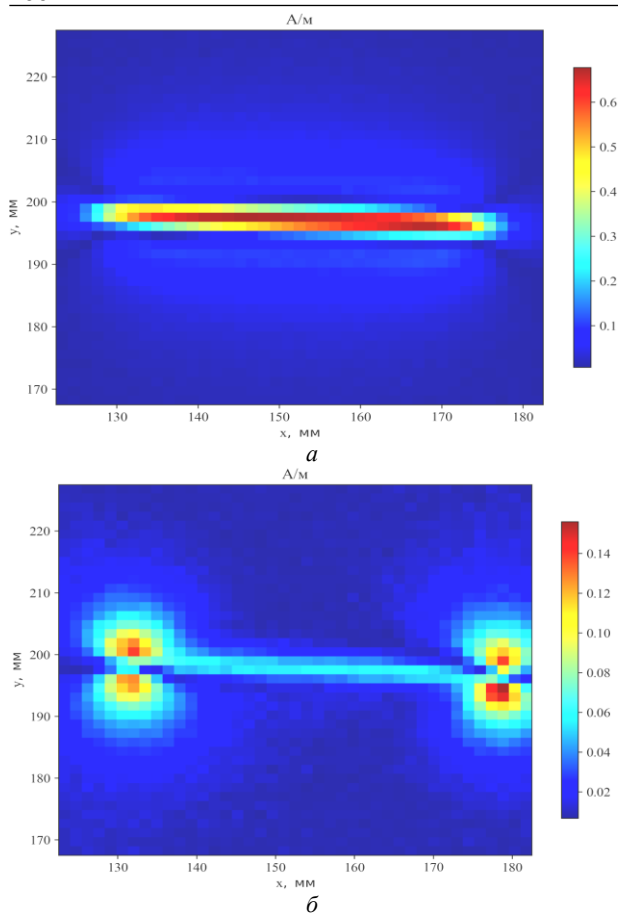


Рис. 5. Распределения полей H_x (а) и H_y (б), вычисленные из дипольных моментов для МЛП

Литература

1. Weng H. Estimation of current from near-field measurement / H. Weng, D.G. Beetner, R.E. DuBroff, J. Shi // 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005. – IEEE, 2005. – Vol. 1. – P. 222–227.
2. Baudry D. Applications of the near-field techniques in EMC investigations / D. Baudry, C. Arcambal, A. Louis, B. Mazari et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2007. – Vol. 49, No. 3. – P. 485–493.
3. de Daran F. Prediction of the field radiated at one meter from PCB's and microprocessors from near EM field cartography / F. de Daran, J. Chollet-Ricard, F. Lafon, O. Maurice // 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC'03. – IEEE, 2003. – Vol. 1. – P. 479–482.
4. Wilson P. On correlating TEM cell and OATS emission measurements // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P. 1–16.
5. Yu Z. An improved dipole-moment model based on near-field scanning for characterizing near-field coupling and far-field radiation from an IC / Z. Yu, J.A. Mix, S. Sajuyigbe, K.P. Slattery et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 55, No. 1. – P. 97–108.
6. Physics-based dipole moment source reconstruction for RFI on a practical cellphone / Q. Huang, F. Zhang, T. Enomoto, J. Maeshima et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1693–1700.
7. Wu C. Estimating the near field coupling from SMPS circuits to a nearby antenna using dipole moments / C. Wu, Y. Wang, L. Li, J. Pan // 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – IEEE, 2016. – P. 353–357.
8. Huang Q. Machine learning based source reconstruction for RF desense / Q. Huang, J. Fan // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2018. – Vol. 60, No. 6. – P. 1640–1647.
9. Chuang H.H. A magnetic-field resonant probe with enhanced sensitivity for RF interference applications / H.H. Chuang, G.H. Li, E. Song, H.H. Park et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, No. 6. – P. 991–998.
10. A resonant E-field probe for RFI measurements / G. Li, K. Itou, Y. Katou, N. Mukai et al. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2014. – Vol. 56, No. 6. – P. 1719–1722.
11. Jackson J.D. Classical electrodynamics. – John Wiley & Sons, 2021.
12. Helrich C.S. The classical theory of fields: electromagnetism. – Springer Science & Business Media, 2012.
13. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. – John Wiley & Sons, 2016.
14. Ramesan R. Modeling of radiation source using an equivalent dipole moment model / R. Ramesan, D. Madathil // Progress In Electromagnetics Research B. – 2020. – Vol. 89. – P. 157–175.

Чебанов Виктор Сергеевич

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: victorchebanov1@gmail.com

Семенюк Валерий Александрович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

Эл.: почта: valerii.a.semeniuk@tusur.ru

УДК 621.372.22

М.Д. Юсаф

Перекрестные наводки в двухпроводном модальном фильтре на двухсторонней печатной плате при воздействии электростатического разряда по схемной земле

Впервые моделируется кондуктивное воздействие от протекания тока электростатического разряда в проводнике схемной земли нового модального фильтра. Для этого используется квазистатический анализ в системе TUSUR.EMC. Показано, что уровень перекрестных наводок достигает -94 В ($-18,8\%$) от половины амплитуды электродвижущей силы источника. Из-за асимметрии расположения сигнальных проводников относительно схемной земли разность их перекрестных наводок на ближнем конце достигает 17 В ($3,4\%$) и на дальнем конце -55 В (-11%).

Ключевые слова: перекрестная наводка, квазистатический анализ, схемная земля, преднамеренная электромагнитная помеха, сверхкороткий импульс, модальный фильтр.

Воздействие по цепям схемной земли рассматривается очень редко, особенно в новых устройствах. Между тем это может быть актуально в связи с опасностью результатов такого воздействия. В частности, недавно предложено рассмотреть новый модальный фильтр (МФ) [1], отличающийся наличием сильно связанных проводников, в том числе схемной земли, который очень мало исследован. Так, рассмотрен сверхкороткий импульс (СКИ), воздействующий на один проводник схемной земли относительно другого, и выявлены перекрестные наводки высокого уровня на ближнем и дальнем концах [2]. Аналогично рассмотрен МФ с разными номиналами на концах активного проводника, что дало перекрестную помеху еще более высокого уровня [3]. Между тем целесообразно рассмотреть другие воздействия. Цель работы – выполнить аналогичное исследование, но при воздействии электростатического разряда (ЭСР).

Для анализа взят МФ из [1] с поперечным сечением (рис. 1) и параметрами: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,5$, толщина подложки $h = 1$ мм, толщина проводников $t = 18$ мкм, расстояние между проводниками $s_1 = 0,5$ мм, ширина проводников $w = 1,5$ мм.

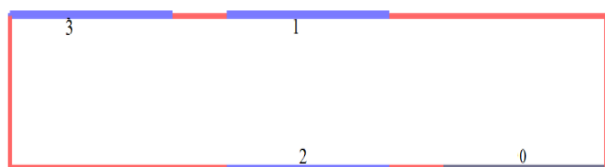


Рис. 1. Поперечное сечение МФ

Схема для моделирования МФ приведена на рис. 2. Проводники 1 и 2 сигнальные и соединены со схемной землей (проводник 0) сопротивлениями 50 Ом. Проводник 3 был соединен на концах со схемной землей, но предполагается, что в разрыв одного соединения включен источник ЭСР с амплитудой электродвижущей силы (ЭДС) 1 кВ по модели заряженного устройства [4]. Длина ($1,5$ м) и нагрузки на проводника 3 (110 Ом) на концах МФ взяты, как в [2].

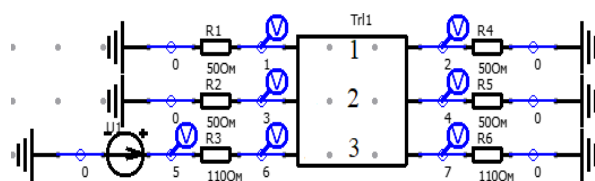


Рис. 2. Схема моделирования МФ

Временные отклики на воздействие ЭСР вычислялись в программе TUSUR.EMC. На рис. 3 показаны формы воздействующей ЭДС (узел V5) и напряжения в узле V6, так что в проводник 3 поступает сигнал почти в половину ЭДС по амплитуде (507 В).

Воздействие испытывает модальное разложение, проявляющееся в том, что каждая из его мод распространяется со своей задержкой и своим волновым сопротивлением. Вычисленные погонные задержки: $4,7$; $5,1$; $6,2$ нс/м. При длине линии $1,5$ м сигналы придут к концу линии с задержками: $7,05$; $7,65$; $9,3$ нс. Однако моделирование с ростом длины линии (результаты здесь для экономии места не приводятся) показало, что амплитуда сигнала моды 3 очень мала, и его не видно. Таким образом, к концу линии приходят сигналы моды 1 с задержкой $7,05$ нс и моды 2 – $7,65$ нс. Разность задержек $0,6$ нс, а длительность каждого сигнала $1,2$ нс (рис. 3). Поэтому сигнал моды 2 накладывается на вторую половину сигнала моды 1 (рис. 4). Тем не менее амплитуда напряжения на выходе снижается до 314 В.

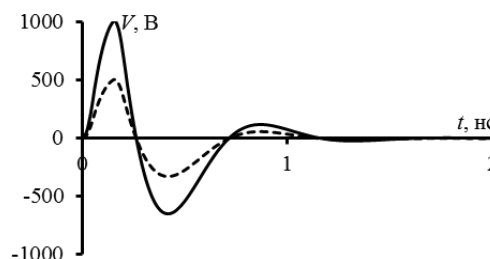


Рис. 3. Формы ЭДС (–) и напряжения в узле V6 (– –)

Рассмотрим перекрестные наводки на проводниках 1 и 2 от ЭСР. Асимметрия расположения этих проводников относительно схемной земли приводит к разным наводкам на них.

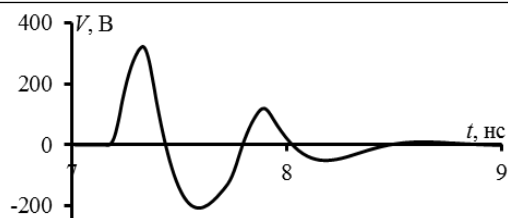


Рис. 4. Форма напряжения в узле V7

Формы напряжения на ближних концах приведены на рис. 5. Из-за довольно сильных связей между проводниками уровень напряжения на проводнике 1 (узел V1) достигает 87 В (17,4% от половины ЭДС) и –55 В (–11%), а проводника 2 (узел V3) – 70 В (14%) и –44 В (–8,8%).

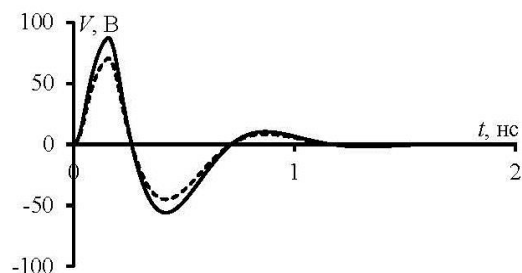


Рис. 5. Формы напряжения в узлах V1 (—) и V3 (---)

На рис. 6 представлена разность напряжения на ближних концах, достигающая 17 В (3,4%) и –11 В (–2,2%).

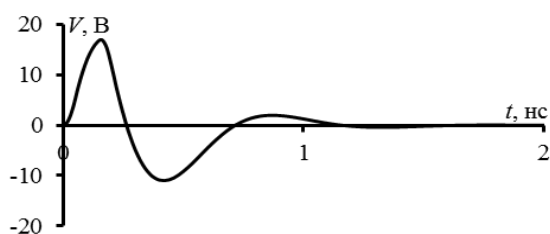


Рис. 6. Разность напряжений V1 и V3

Перекрестная наводка на дальнем конце сложнее (рис. 7), поскольку она определяется не суммой (как на ближнем конце), а разностью коэффициентов емкостной и индуктивной связей между проводниками. Кроме того, влияет модальное разложение из-за разности задержек мод, расширяющее сигнал во времени. Максимальная поляризация начинается с импульса положительной полярности с уровнем 77 В (15,4%) и продолжается отрицательной – –94 В (–18,8%).

На рис. 8 представлена разность напряжений на дальних концах, достигающая –55 В (–11%) и 53 В (10,6%).

В результате рассмотрено воздействие ЭСР по цепям заземления МФ, отличающегося наличием сильно связанных проводников, асимметрично расположенных относительно схемной земли. Моделирование квазистатическим анализом в системе TUSUR.EMC показало высокий уровень перекрестных наводок: до –94 В (–18,8% от половины амплитуды ЭДС воздействия). Также вычислены разности перекрестных наводок: максимальная из них на

ближнем конце достигает 17 В (3,4%), а на дальнем – –55 В (–11%).

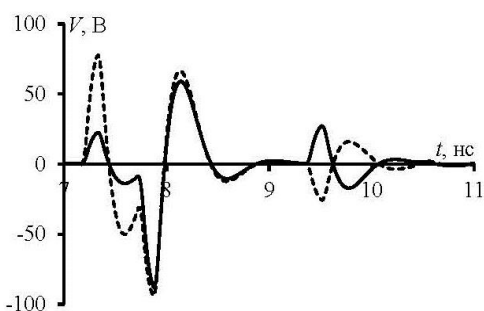


Рис. 7. Формы напряжения в узлах V2 (—) и V4 (---)



Рис. 8. Разность напряжений V2 и V4

Между тем рассмотрен только один набор значений всех параметров МФ. Поэтому в перспективе будут рассмотрены другие их значения, которые могут дать еще больший уровень перекрестных наводок.

Исследование выполнено в ТУСУРе за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00579, <https://rscf.ru/project/24-29-00579/>.

Литература

1. Патент РФ на изобретение № 2784710. Способ трассировки двухсторонней печатной платы с модальным резервированием и уменьшенным количеством проводников / Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. Заявка № 20221 22228. Приоритет изобретения 16.08.2022. Оpubл.: 29.11.2022. Бюл. № 34.
2. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в двухпроводном модальном фильтре на двухсторонней печатной плате при воздействии сверхкороткого импульса по схемной земле / М.Д. Юсаф, Т.Р. Газизов // VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 10, 11 апреля 2025 г. – Омск: ОмГУПС, 2025. – С. 366–371.
3. Газизов Т.Р. Перекрестные наводки в двухпроводном модальном фильтре на двухсторонней печатной плате при воздействии сверхкороткого импульса в схемной земле с разными граничными условиями / Т.Р. Газизов, М.Д. Юсаф // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2025. – № 4. – С. 1–7. В печати.
4. ГОСТ Р 53734.3.3–2016. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатических разряд. Модель заряженного устройства. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.

Юсаф Мухаммад Джунаид

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа

ORCID: 0009-0009-9764-143X

Эл. почта: junaidyousaf761@gmail.com

Е. Зима

Применение пространственной декомпозиции для моделирования симметричных антенных решеток

Данная статья посвящена разработке новых способов применения пространственной декомпозиции для расчета симметричных антенных решеток (АР). Предложено заменить некоторые группы антенных элементов на аналогичные, расположенные зеркально. Тестирование способов выполнено на примере моделирования квадратной АР из 400 антенных элементов. Ключевым преимуществом разработанных способов является их высокая вычислительная эффективность при расчете электрически больших симметричных АР.

Ключевые слова: антенная решетка, пространственная декомпозиция, диаграмма направленности, вычислительные затраты.

Широкое применение антенных решеток (АР) в современных радиотехнических системах обуславливает повышенные требования к точности их проектирования, ключевым этапом которого является моделирование. Для точного расчета диаграммы направленности (ДН) АР и иных ключевых характеристик необходимо учитывать электромагнитное взаимодействие отдельных антенных элементов (АЭ) [1]. Это достигается путем решения полной электродинамической задачи для всей структуры численными методами. Несмотря на высокую точность, такой подход требует значительных вычислительных ресурсов, особенно для электрически больших АР. В силу этого на практике широкое распространение получили упрощенные методы, такие как метод парциальных диаграмм [2] и подход с использованием множителя направленности.

Также в последнее время активно развиваются методы расчета характеристик АР, основанные на принципах пространственной декомпозиции [3]. Данный метод основан на методе парциальных диаграмм и предполагает деление АЭ на группы с последующим обособленным расчетом. В работах [4, 5] оценена его вычислительная эффективность при расчете АР из 100 и 400 АЭ.

Для снижения вычислительных затрат предлагается уменьшить число групп АЭ при расчете симметричных АР. Цель работы – получить способ пространственной декомпозиции, оптимизирующий моделирование таких решёток.

Пространственная декомпозиция

Пример деления АЭ на группы в квадратной АР представлен на рис. 1. При этом результирующая ДН каждой группы определяется как

$$\hat{f}_g(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \hat{I}_n \hat{f}_n(\theta, \varphi) e^{j(\Phi_{xn} + \Phi_{yn} + \Phi_{zn})}, \quad (1)$$

где $\hat{f}_n(\theta, \varphi)$ – ДН n -го АЭ в группе, $\hat{I}_n$ – комплексная амплитуда возбуждения n -го излучателя в группе, Φ_{xn} , Φ_{yn} и Φ_{zn} – пространственные фазовые сдвиги вдоль осей x , y и z , определяемые как

$$\Phi_{xn} = \frac{2\pi}{\lambda} X_n \sin(\theta) \cos(\varphi), \quad (2)$$

$$\Phi_{yn} = \frac{2\pi}{\lambda} Y_n \sin(\theta) \sin(\varphi), \quad (3)$$

$$\Phi_{zn} = \frac{2\pi}{\lambda} Z_n \cos(\theta), \quad (4)$$

где X_n , Y_n и Z_n – координаты n -го излучателя в решетке.

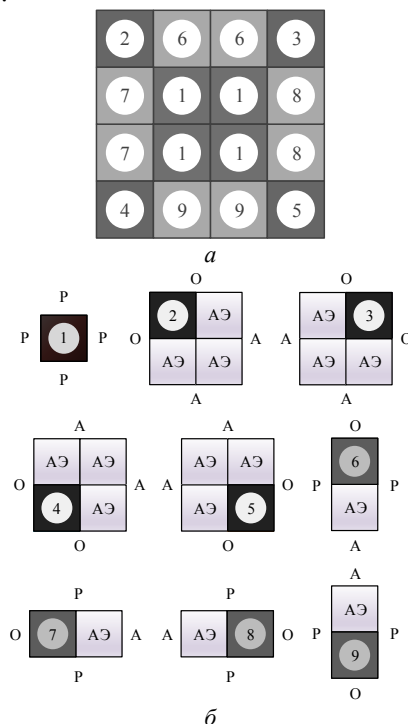


Рис. 1. Классификация АЭ по группам (а), граничные условия каждой группы (б) [4]: P – периодические граничные условия, O – открытые, А – поглощающие

Процедура расчета ДН АР разбивается на несколько этапов. В каждом этапе рассчитывается результирующая ДН соответствующей группы, а ДН всей АР получается в результате суммирования ДН всех групп на основе принципа суперпозиции волн.

$$\hat{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \hat{f}_{gm}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где M – число групп.

Декомпозиция для симметричных АР

При применении декомпозиции для АР, в которых АЭ располагаются симметрично, возможно существенно ускорить процесс моделирования. Это

происходит за счет замены ДН некоторых групп аналогичными. Например, при вертикальной симметрии ДН группы 3 можно заменить на ДН группы 2, предварительно ее отзеркалив (рис. 2, а). Аналогично можно заменить ДН группы 5 на ДН группы 4 (рис. 2, б). ДН групп 6 и 9 оказываются почти идентичными (рис. 2, в), а ДН групп 7 и 8 зеркально повторяют друг друга (рис. 2, в). Следует отметить, что при изменении углового сечения (плоскости φ) состав эквивалентных пар групп изменяется. В случае $\varphi = 90^\circ$ идентичными оказываются ДН групп 2 и 3 (рис. 3, а), 4 и 5 (рис. 3, б), 7 и 8 (рис. 3, в), а ДН группы 9 зеркально повторяет ДН группы 6 (рис. 3, г). Если АР симметрична по горизонтали и вертикали, то исчезает необходимость считать группу 4, так как ее ДН будет аналогична ДН группы 2. Таким образом можно изменить подход к делению АЭ на группы (рис. 4).

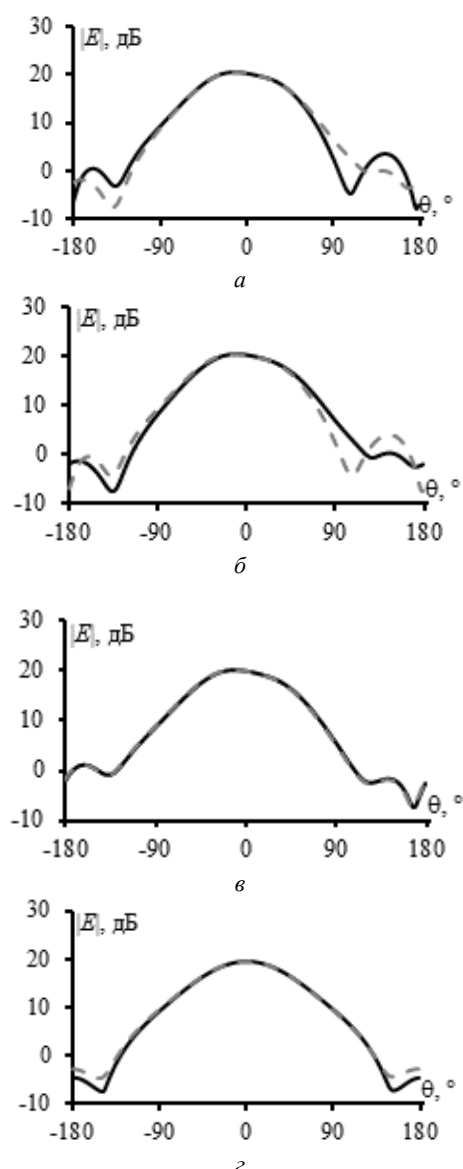


Рис. 2. Угловая зависимость модуля напряженности электрического поля $|E|$ групп 3 и 2 (а), 5 и 4 (б), 8 и 7 (в), 9 и 6 (г) для $\varphi = 0^\circ$: исходная группа (—), ее замена (---)

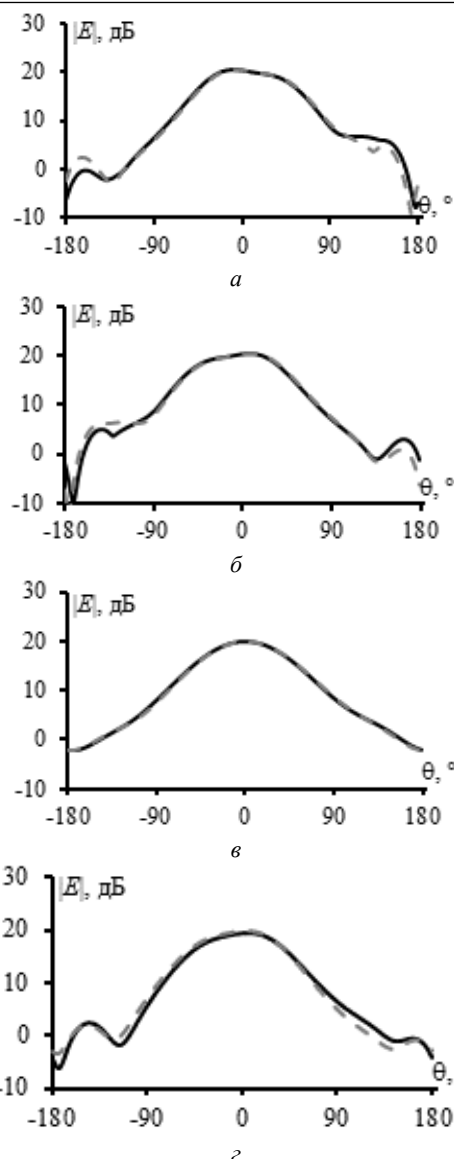


Рис. 3. Угловая зависимость модуля напряженности электрического поля $|E|$ групп 3 и 2 (а), 5 и 4 (б), 8 и 7 (в), 9 и 6 (г) для $\varphi = 90^\circ$: исходная группа (—), ее замена (---)

2	6	6	2'
7	1	1	7'
7	1	1	7'
4	6	6	4'

Рис. 4. Классификация АЭ для вертикально симметричной АР при $\varphi = 0^\circ$ (2', 7', 4' – группы с отзеркаленными ДН)

Тестирование предложенных способов

Для тестирования предложенных способов проведено моделирование квадратной АР из 400 АЭ. В качестве АЭ рассмотрена шестиугольная печатная антенна со скошенными углами (рис. 5) на диэлектрической подложке с $\epsilon_r = 2,2$ и толщиной 1,57 мм. Геометрические параметры печатной антенны: $W_s = 145$ мм, $L_s = 145$ мм, $L_p = 90$ мм, $W_p = 104$ мм, $T_p = 22$ мм.

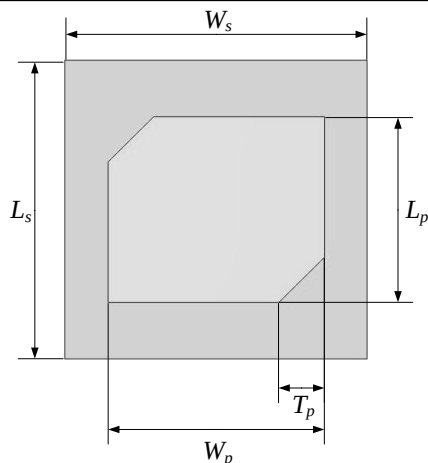


Рис. 5. Модель тестового АЭ

На рис. 6 представлены угловые зависимости $|E|$ в двух ортогональных плоскостях, полученные в результате расчета полной АР методом конечных разностей во временной области (МКРВО), классической декомпозицией и двумя предложенными способами. Расчет выполнен на частоте 1,16 ГГц при изменении угла θ от -180 до 180° . Из рисунка видно, что результаты, полученные предложенными способами, практически идентичны полученным классической декомпозицией и согласуются с полным расчетом при среднем отклонении не более 5 дБ.

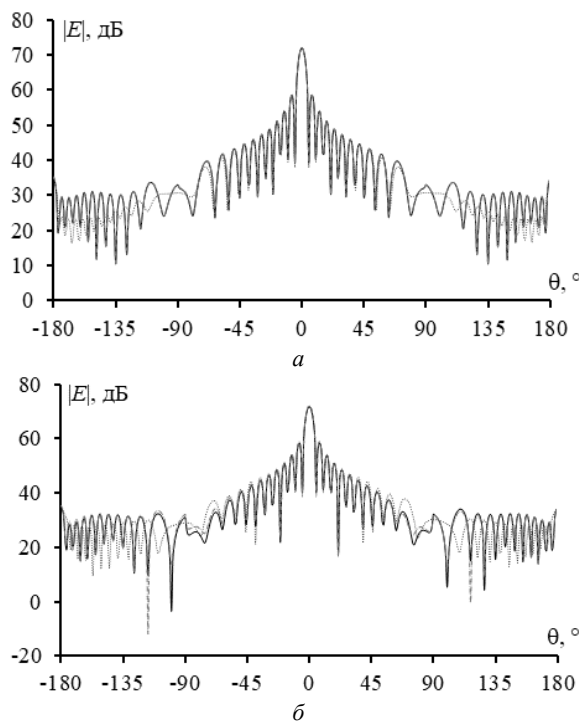


Рис. 6. Угловая зависимость $|E|$ АР для $\varphi=0^\circ$ (а) и $\varphi=90^\circ$ (б): полный расчет (.....), классическая декомпозиция (—), вертикальная симметрия (- · - ·), вертикальная и горизонтальная симметрии (---)

В таблице представлено сравнение вычислительных затрат при расчете тестовой АР. Замена групп при вертикальной симметрии уменьшает затраты памяти на 46 и 72% по сравнению с классиче-

ской декомпозицией и полным моделированием соответственно. При вертикальной и горизонтальной симметриях – на 61 и 80%. Время моделирования при вертикальной симметрии также сокращается на 50 и 72%, а при вертикальной и горизонтальной – на 65 и 80%.

Вычислительные затраты

Способ моделирования	Память, Гб	Время, мин
Полный расчет	1,674	47
Классическая декомпозиция	0,87	26
Вертикальная симметрия	0,466	13
Вертикальная и горизонтальная симметрии	0,338	9

Заключение

В работе предложены способы применения пространственной декомпозиции для расчета симметричных АР. Выполнено моделирование квадратной АР из 400 АЭ МКРВО классической декомпозицией и двумя предложенными способами. Полученные результаты согласуются с полным моделированием. Подтверждена вычислительная эффективность предложенных способов по сравнению с классической декомпозицией и полным моделированием. Замена групп позволяет сократить затраты памяти и времени более чем в два раза.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных способов и демонстрируют возможность их использования при проектировании электрически больших симметричных АР. В дальнейшем планируется исследовать возможность замены групп в АР различных топологий.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

1. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
2. Pozar D.M. The active element pattern // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1994. – Vol. 42. P. 1176–1178.
3. Zhou H. A Novel Unit Classification Method for Fast and Accurate Calculation of Radiation Patterns / H. Zhou, J. Li, K. Wei // Electronics. – 2023. – Vol. 12. – P. 3512.
4. Торопов В.В. О моделировании антенных решеток с применением принципов пространственной декомпозиции // Матер. XXIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2024»: в 3 ч., Томск, Россия, 15–17 мая, 2024 г. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2024. – Ч. 3. – С. 67–70.
5. Toropov V.V. On Simulation of Antenna Arrays Using Domain Decomposition Principles / V.V. Toropov, A.A. Ivanov // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2024. – P. 740–743.

Зима Елизавета

Инженер каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Эл. почта: zima_liza_1503@mail.ru

К.С. Лукас, Т.Ф. Данг

Использование САПР для вычисления модуля напряженности электрического поля в ближней зоне проводных антенн

Приведены результаты моделирования электрического поля в ближней зоне диполя и антенны «чайка» в системах TUSUR.EMC, FEKO и 4NEC2. Представлены зависимости модуля напряженности электрического поля антенн от расстояния и частоты. Показано хорошее совпадение результатов для диполя и гораздо меньшее для антенны «чайка».

Ключевые слова: ближняя зона, проводные антенны, САПР.

Недавно предложен и детально исследован способ создания разреженных антенн и рассеивателей из проводной сетки на основе аппроксимации оптимальной токовой сеткой, позволяющей достичь контролируемого уменьшения их массы при сохранении радиотехнических характеристик [1, 2]. Аналогичная аппроксимация может быть применена к проектированию разреженных экранов. Для проектирования таких экранов необходимо вначале провести оценку электромагнитных характеристик, в частности, модуля напряженности электрического поля $|E|$ в ближней зоне.

Контроль $|E|$ в ближней зоне позволяет улучшить электромагнитную совместимость и повысить качество и надежность радиоэлектронных средств [3, 4]. Для анализа $|E|$ в процессе проектирования широко применяется моделирование даже простых проводных антенн, в частности, дипольных. Использование систем автоматизированного проектирования (САПР) становится не просто полезным, а неотъемлемым инструментом для моделирования и решения различных инженерных задач. Моделирование антенн требует высокой точности, учета электромагнитных взаимодействий, а также оптимизации по множеству параметров. Такие системы, как TUSUR.EMC, FEKO и 4NEC2, позволяют моделировать сложные электромагнитные структуры и анализировать параметры поля, что существенно повышает эффективность разработки и снижает затраты на экспериментальные исследования [5].

Сравнение результатов моделирования ближнего поля диполя в TUSUR.EMC и 4NEC2 приведено в [6], однако рассмотрена только зависимость составляющих электрического поля от положения точки наблюдения. Кроме того, сравнение частотной зависимости напряженности ближнего поля в этих САПР ранее не рассматривалось. Поэтому цель данной работы – вычисления $|E|$ в ближней зоне проводных антенн (диполя и антенны «чайка») в системах TUSUR.EMC, FEKO и 4NEC2.

На рис. 1 показан общий вид диполя (расположен вдоль оси Ox) длиной 100 м и антенны «чайка» (расположена в плоскости xOy) длиной 1,5 м (размеры: $h_1 = 0,1$ м, $h_2 = 0,4$ м, $h_3 = 0,25$ м). Структуры дискретизированы на 321 и 294 (на h_1 20 сегментов, h_2 – 78, h_3 – 49) сегмента с радиусами проводов 10 и 5 мм соответственно. Источник возбуждения размещён в центре антенн.

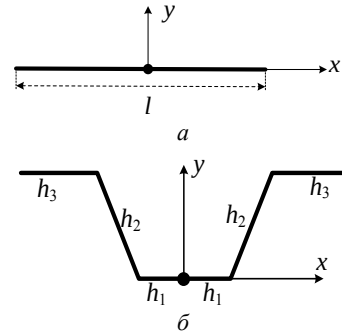


Рис. 1. Диполь (а) и антенна «чайка» (б)

На рис. 2 показаны зависимости $|E|$ диполя от расстояния на заданной частоте (1,5 МГц). В точках $(x, 10, 0)$ уровень растет до максимума при $x = 40$ м. В точках $(x, 100, 0)$ с ростом x уровень спадает. Результаты TUSUR.EMC, FEKO и 4NEC2 в целом, хорошо согласуются.

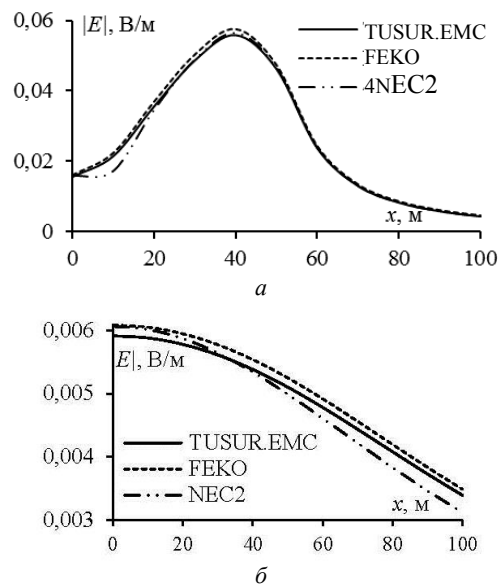


Рис. 2. Зависимости $|E|$ диполя на частоте 1,5 МГц от расстояния в точках: $(x, 10, 0)$ – а; $(x, 100, 0)$ – б

Частотные зависимости поля диполя приведены на рис. 3, где есть пики на частотах 1,5; 4,5 и 7,5 МГц. Результаты хорошо совпадают во всём диапазоне частот. Лишь в некоторых местах видны различия.

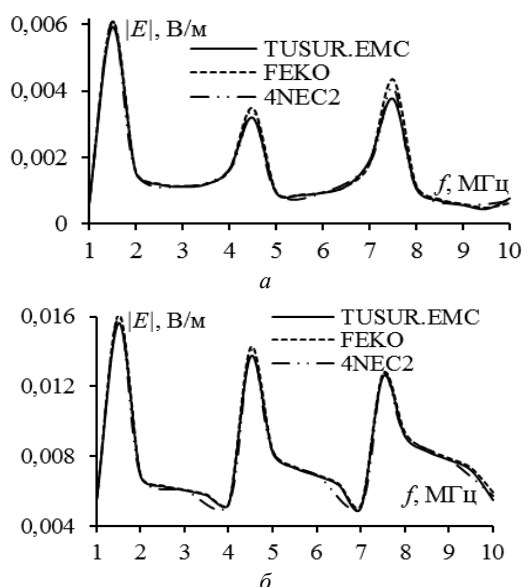


Рис. 3. Частотные зависимости $|E|$ диполя в точках:
 $a - (0, 100, 0)$; $b - (0, 10, 0)$

На рис. 4 показаны зависимости $|E|$ антенны «чайка» от расстояния также на частоте 1,5 МГц. Здесь, в точке $(x, 2, 0)$ заметно, что вдоль антенны уровень падает до минимума при $x = 1$ м. Результаты частотных зависимостей поля этой же антенны приведены на рис. 5. В обоих случаях видно, что отклонения результатов TUSUR.EMC большие. Причиной может быть использование разных базисных и тестовых функций: в TUSUR.EMC используются ступенчатые базисные и дельта-функции как тестовые, а в FEKO и 4NEC2 – треугольные базисные и тестовые функции [6–9].

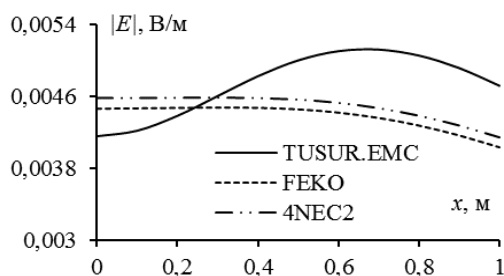


Рис. 4. Зависимости $|E|$ антенны «чайка» от расстояния в точке $(x, 2, 0)$ на частоте 1,5 МГц

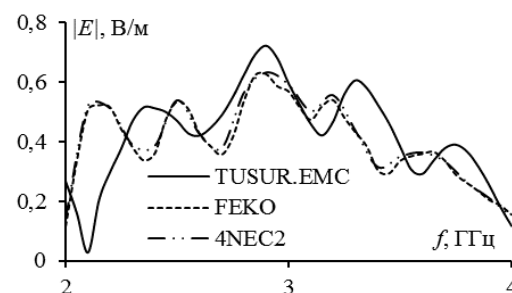


Рис. 5. Частотные зависимости $|E|$ антенны «чайка» в точке $(0, 1, 0)$

Таким образом, представлены результаты моделирования $|E|$ в ближней зоне диполя и антенны «чайка» в системах TUSUR.EMC, FEKO и 4NEC2. Хорошее совпадение результатов, полученных в этих системах, подтверждает их возможности моделирования ближнего поля проводных структур. Между тем даже малое усложнение структуры может сильно менять результаты при простых подходах к моделированию. Поэтому в этих САПР исследовать характеристики сложных экранов, особенно разреженных, надо с особой внимательностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Нгуен М.Т. Инновационные подходы к проектированию разреженных проводно-сеточных антенн: разработка алгоритмов и оценка их эффективности // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 1–47.
2. Dang T.P. Generation of sparse antennas and scatterers based on optimal current grid approximation / T.P. Dang, M.T. Nguyen, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Algorithms. – 2025. – Vol. 18, No. 3. – P. 171.
3. Широкова И.Б. Исследование поля ближней зоны излучения ферритовой магнитной антенны / И.Б. Широкова, М.А. Дурманова, И.В. Скорика // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 4. – С. 1–13.
4. Said M.M. A Theory of Antenna Electromagnetic Near Field: Part I / M.M. Said, M.A. Yahia // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Vol. 59. – P. 4691–4705.
5. Нгуен М.Т. Верификация результатов применения аппроксимации оптимальной токовой сеткой в разных САПР / М.Т. Нгуен, А.Ф. Алхадж Хасан // XXII Междунар. конф. им. А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», 4–9 декабря 2023 г., Томск. – Томск: ТУСУР, 2023. – С. 271–278.
6. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. дис. ... д-ра техн. наук: 16.12.2010. – С. 188–195.
7. NEC visualization, optimization and sweeping tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://antennatestlab.com/wp-content/uploads/2017/05/4Nec2-Manual.pdf>, свободный (дата обращения: 17.09.2025).
8. Зейде К.М. Проектирование в Altair FEKO: учеб.-метод. матер. – Екатеринбург: УрФУ, 2024. – 21 с.
9. Basis Function. Altair Feko [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.altair.com/2021/feko/topics/feko/user_guid/solver_solution_methods/basis_functions_feko_c.htm, свободный (дата обращения: 15.09.2025).

Лукас Канга Самуел

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
 Томского государственного ун-та
 систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
 Эл. почта: cangasamuel01@yandex.ru

Данг Туан Фыонг

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
 Эл. почта: dangtuanphuong01111998@gmail.com

А.К. Томилин, И. Мисюченко, В.С. Викулин

Исследование электромагнитного поля тороида и обеспечение ЭМС радиоэлектронных систем

Экспериментально обнаружено потенциальное электрическое поле в магнитной системе тороидального типа при периодическом изменении ее радиального размера. Это объясняется возникновением конвективной производной векторного потенциала. Результаты исследования рекомендуется учитывать при решении задач электромагнитной совместимости (ЭМС) с подвижными тороидальными системами.

Ключевые слова: обобщенная электродинамика, векторный потенциал, магнитное поле.

Тороидальные трансформаторы (дрессели) часто применяются в различных электротехнических и радиоэлектронных приборах, например, в авионике самолетов и в медицинском оборудовании, а также в высокоскоростных системах передачи данных. Тороиды имеют незначительное рассеяние магнитного потока, максимальную магнитную проницаемость и минимальные потери мощности в магнитопроводе. Это создает ряд преимуществ в сравнении с соленоидальными катушками и открывает значительные инновационные перспективы в приборостроении, несмотря на некоторые технологические трудности при их изготовлении.

Однако при исследовании электромагнитного поля вблизи тороидальных систем обнаруживаются некоторые на первый взгляд парадоксальные эффекты. Например, в статье [1] описан эксперимент с тороидальным соленоидом (тороидом), по которому пропускается ток частотой 50 Гц. Обмотка тороида заключена в сплошной заземленный экран. Измеренная электрометрическим методом ЭДС на оси внутреннего отверстия тороида (за пределами экранированной области) составляет 250 мВ. Следовательно, там присутствует потенциальное электрическое поле. Очевидно, это поле распространяется вдоль осевой линии и за пределы тороида. Показано, что этот эффект не связан с электромагнитными полями рассеяния.

В статье [2] представлены результаты еще двух экспериментов по прямому измерению электрического поля в отверстии тороида с переменным током частотой 50 Гц. В первом эксперименте использован экранированный зарядочувствительный датчик в виде металлического стержня. При этом измеренное действующее значение напряженности электрического поля на оси тороида составляет $\bar{E}_x = 9,17 \text{ В/м}$. Во втором эксперименте применен ползунковый реостат, включенный по схеме потенциометра. Установлена линейная зависимость $\bar{E}_x(x)$.

Происхождение электрического поля, обнаруженного в экспериментах на оси тороида, объясняется на основе представлений о независимом векторном потенциале. В связи с этим возникает вопрос соответствия поля вектор-потенциала теореме Гельмгольца о разложении на соленоидальную $\mathbf{A}_s$ и потенциальную $\mathbf{A}_p$ компоненты.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_p. \quad (1)$$

Потенциальная компонента $\mathbf{A}_p$ обычно исключается калибровками Кулона или Лоренца. Однако, как оказалось, она обладает определенным физическим содержанием. Это совпадает с заключением, сделанным в статье [3]: «...векторный потенциал важнее электрических и магнитных полей. Поля векторного потенциала могут бесконтактным образом генерировать электрические поля через проводящие вещества». Аналогичный вывод сделан в статье [4]. Свойства вектора $\mathbf{A}_p$ исследованы также в работах, сведения о которых систематизированы в монографиях [5, 6].

В экспериментах, описанных в статьях [1, 2], напряженность электрического поля связана с векторным потенциалом соотношением

$$\mathbf{E}_p = -\frac{\partial \mathbf{A}_p}{\partial t}. \quad (2)$$

Отметим, что здесь используется локальная производная вектор-потенциала по времени. В общем случае, когда имеются подвижные магнитные элементы, необходимо учитывать и конвективную производную векторного потенциала. Подобная ситуация возникает, например, в магнитных подшипниках, когда происходят осевые колебания магнитов, расположенных на оси ротора по отношению к неподвижным магнитам на стойке. При этом требуется обеспечить условия ЭМС с датчиками, усилителями мощности, контроллерами и т.д.

Цель настоящей работы заключается в обнаружении и исследовании конвективной производной векторного потенциала в тороидальных системах с учетом ее возможного влияния на ЭМС в электронных системах.

Предложим эксперимент, в котором в магнитной системе тороидального типа проявляется конвективная производная вектора $\mathbf{A}$. Схема первого варианта эксперимента приведена на рис. 1. Два плоских магнита, обращенных в сторону зрителя разными полюсами, синхронно совершают встречные периодические движения при помощи актуаторов. Такая система магнитов создает магнитное поле, аналогичное полю тороида с постоянным током.

Пусть на линии симметрии между магнитами располагается достаточно длинный медный провод-

ник, замкнутый на микроамперметр. Заметим, что суммарное магнитное поле на линии расположения проводника в любой момент времени равно нулю. Замыкающие проводники находятся достаточно далеко от магнитов и расположены в плоскости, ортогональной плоскости магнитов. В результате прибор фиксирует периодический ток с частотой движения магнитов.

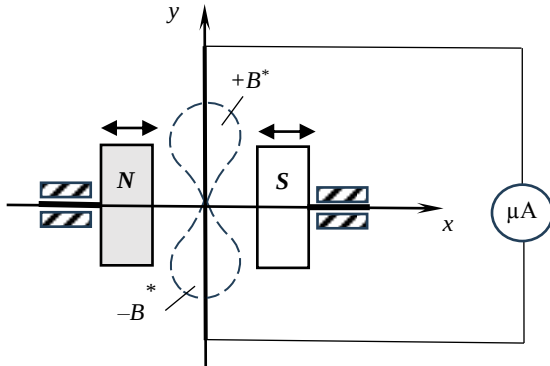


Рис. 1. Первый вариант эксперимента

Этот вариант эксперимента достаточно прост, но обладает недостатком: имеется замкнутый измерительный контур, из-за этого можно заключить, что результат эксперимента объясняется на основе закона вихревой электромагнитной индукции. Однако заметим, что, как установлено экспериментально, наблюдаемый эффект практически не зависит от размеров замыкающего контура и расположения проводников. Тем не менее предложим вариант эксперимента, исключающий указанный недостаток.

Во втором эксперименте использован электрометрический метод (рис. 2).

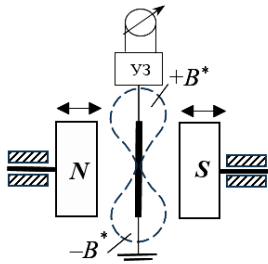


Рис. 2. Второй вариант эксперимента

Вместо проводника на оси симметрии между магнитами расположен электрометрический зонд – стальной стержень длиной 35 мм и диаметром 3 мм, на который надета изолирующая трубка, покрытая графитовым лаком. Сопротивление графитового слоя – примерно 30 кОм. На трубке закреплен проводник с очень низким сопротивлением (менее 0,1 Ом), он замыкает оба конца графитового слоя для обеспечения его эквипотенциальности. Электрическая емкость зонда составляет 25 пФ, сопротивление – более 10 ГОм. К зонду подключен экранированный кабель: центральная жила припаяна к зонду, а оплетка – к экрану. Далее центральная жила соединена с усилителем заряда и выходит на стрелочный регистратор (микроамперметр).

При встречно-поступательном движении магнитов прибор показывает переменное напряжение. В то же время напряжение между торцами трубчатого высокоомного экрана не регистрируется. Это позволяет сделать вывод, что при движении магнитов на зонд действует электрическое поле индукции, вызванное механическим перемещением магнитов. Очень важно заметить, что индуцированное электрическое поле возникает внутри заземленного экрана. Это подтверждает выводы, процитированные выше из статей [3, 4]. При этом векторное магнитное поле в зоне расположения зонда всё время остаётся исчезающе малым.

Очевидно, в описанных выше экспериментах проявляется конвективная компонента векторного потенциала, следовательно, ее следует учитывать в общем случае, используя в (2) полную производную [7].

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{A}_p + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{A}_s, \quad (3)$$

где $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$ – скорость движения магнитов вдоль оси x и, поскольку $v = v_x$,

$$(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{A}_p = v_x \frac{\partial \mathbf{A}_p}{\partial x}, \quad (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{A}_s = v_x \frac{\partial \mathbf{A}_s}{\partial x}.$$

Заметим, что в (3) первый и третий члены в данном случае равны нулю. Второй член связан с потенциальным электрическим полем, которое обнаружено в экспериментах.

$$\mathbf{E}_p = -v_x \frac{\partial \mathbf{A}_p}{\partial x}. \quad (4)$$

Здесь дивергенция $\mathbf{A}$ не равна нулю, поэтому в обобщенной электродинамике [5] вместо калибровки Кулона используется соотношение

$$B^* = -\nabla \cdot \mathbf{A} \quad (5)$$

и вводится понятие «скалярное магнитное поле» (СМП), индукция которого обозначается B^* . Эксперименты с СМП и его теоретическое описание, а также обзор публикаций, связанных с ним, приведены в монографиях [5, 6]. СМП изображено на рис. 1 и 2 в виде двух областей с учетом знаков скалярной функции B^* . Тогда полную производную векторного потенциала по времени в общем случае можно записать в виде

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{v}B^* + \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

С учетом (4) в проводнике или в электрометрическом зонде возникает ЭДС.

$$\varepsilon(t) = \int_{-h}^h E_y dy = -v_x(t) \int_{-h}^h \frac{\partial A_y}{\partial x} dy, \quad (6)$$

где $2h$ – размер магнитов вдоль оси y .

Источники поля вектора $\mathbf{A}$ расположены в области отрицательного СМП, а стоки – в области положительного. В соответствии с исследованием распределения СМП, произведенным в [5], векторный потенциал вблизи оси y можно аппроксимировать функцией

$$A_y = A_{y(\max)} \cos\left(\frac{\pi}{2h}y\right) \cos\left(\frac{\pi}{2l}x\right), \quad (7)$$

где $x = l + a[1 + \sin(\omega t)]$, a и ω – соответственно амплитуда и циклическая частота движения магнитов, $2l$ – минимальное расстояние между ними.

Подставив (7) в (6), получим функцию ЭДС в проводнике, расположенном на оси y :

$$\varepsilon(t) = 2A_{y(\max)} \frac{h}{l} v_x(t).$$

Поскольку $v_x = a \omega \cos \omega t$, где $a = 1$ см,

$$\varepsilon(t) = 2A_{y(\max)} \frac{h}{l} a \omega \cos(\omega t). \quad (8)$$

Параметры экспериментальной установки: линейные размеры $l = 2$ см, $h = 1,5$ см, циклическая частота колебаний магнитов $\omega = 6,28$ с⁻¹. При этом измеренное действующее значение ЭДС составило $\bar{\varepsilon} = 110$ мкВ. Используя эти значения, можно вычислить максимальную величину незавихрённого векторного потенциала

$$A_{y(\max)} = \frac{\bar{\varepsilon} l}{\sqrt{2} h \omega a} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} \cdot \text{м}. \quad (9)$$

Источники поля вектора $\mathbf{A}$ расположены в области отрицательного СМП, а стоки – в области положительного. В соответствии с исследованием распределения СМП, произведенным в [5], векторный потенциал вблизи оси y можно аппроксимировать функцией

$$B^* = -\frac{\partial A_y}{\partial y} = A_{y(\max)} \frac{\pi}{2h} \sin\left(\frac{\pi}{2h} y\right) \cos \omega t. \quad (10)$$

На торце тороидальной системы при $y = h$ его амплитудное значение составляет

$$B^* = A_{y(\max)} \frac{\pi}{2h} = 0,167 \text{ Тл}.$$

Таким образом, показано, что на торцах тороидальной магнитной системы с подвижными элементами генерируется нестационарное СМП. В соответствии с законом безвихревой электромагнитной индукции, описанным в [5],

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t},$$

при изменении СМП генерируется потенциальное электрическое поле. Оно способно проникать сквозь электропроводные поверхности и воздействовать на соседние элементы электронного оборудования. При этом производная $\varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t}$ имеет размерность

плотности электрического заряда. В данном случае ее максимальное значение составляет

$$\left(\varepsilon' \varepsilon_0 \frac{\partial B^*}{\partial t} \right)_{\max} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^3.$$

Заметим, что такое малое значение получено для частоты 1 Гц. При использовании в радиоэлектронных системах тороидальных катушек с высокочастотным током оно значительно увеличивается.

Закон релаксации потенциального электрического поля (или соответствующей плотности эффек-

тивного заряда) вдоль оси тороида с увеличением расстояния от его торца требует исследования в каждом конкретном случае с использованием формул обобщенной электродинамики.

В качестве выводов отметим следующее:

1. Исследование проблемы ЭМС с тороидальными элементами следует начинать с определения векторного электродинамического потенциала с учетом его соленоидальной и потенциальной компонент.
2. В квазистационарных задачах ЭМС следует учитывать потенциальное электрическое поле, действующее вдоль оси тороида, которое способно проникать сквозь металлический экран.
3. Заметим, что такое малое значение получено для частоты 1 Гц. При использовании в радиоэлектронных системах тороидальных катушек с высокочастотным током оно значительно увеличивается.
4. В задачах с подвижными магнитными элементами следует использовать полную производную векторного потенциала по времени, что позволяет определить СМП и учесть его влияние на соседствующие электронные элементы.

Литература

1. Томилин А.К. Исследование квазистационарного электромагнитного поля на оси тороидального соленоида электрометрическим методом / А.К. Томилин, И. Мисюченко, В.С. Викулин // Прикладная физика. – 2024. – № 5. – С. 5–11. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-5-11.
2. Томилин А.К. Обнаружение электрического поля, индуцированного тороидом с низкочастотным током / А.К. Томилин, И. Мисюченко, В.С. Викулин // Прикладная физика (в печати).
3. Lekchaum S. Modeling and Numerical Simulation for a Spherical Vector-Potential Coil / S. Lekchaum, M. Daibo // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2020. – Vol. 30. No. 4. – P. 1. DOI:10.1109/TASC.2020.2970918.
4. Апельцин В.Ф. О влиянии металлических экранов на поле векторного потенциала / В.Ф. Апельцин, А.И. Полетаев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 9. – С. 1–8 [Электронный ресурс]. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/955.html>
5. Томилин А.К. Обобщенная электродинамика. – М.: Триумф, 2020. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04.
6. Zohuri B. Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. – Springer, 2019. – P. 443. DOI: 10.1007/978-3-319-91023-9_6.
7. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

Томилин Александр Константинович

Гл. науч. сотр., д.ф.-м.н., проф. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
Эл. почта: aktomilin@gmail.com

Мисюченко Игорь

Нач. инновационного отд., к.т.н.,
АО «Русский алюминий менеджмент»
Эл. почта: ruberoid2101@gmail.com

Викулин Владимир Станиславович

Инженер компании «Макрогрупп»
Эл. почта: v_vikulin@mail.ru

М.А. Ромащенко, А.В. Гудков

Экстракция паразитных параметров пассивных компонентов корректора коэффициента мощности

Рассмотрено применение импедансного подхода к экстракции паразитных параметров пассивных компонентов на примере силового дросселя и фильтрующего конденсатора корректора коэффициента мощности. Представлены эквивалентные схемы для моделирования в среде LTspice амплитудно-частотных характеристик импеданса компонентов. Полученные результаты могут быть использованы для схемотехнического моделирования в среде LTspice эмиссии кондуктивных помех корректорами коэффициента мощности как отдельно, так и в составе AC-DC-преобразователей для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: импульсный источник питания, AC-DC-преобразователь, кондуктивные помехи, электромагнитная совместимость, корректор коэффициента мощности, силовой дроссель, LTspice.

Достижение соответствия импульсных источников питания (ИИП) требованиям стандартов в сфере электромагнитной совместимости (ЭМС) является важным этапом проектирования изделия. Одним из методов, позволяющих сократить временные затраты на данном этапе и провести на ранних стадиях проектирования оценку уровня кондуктивных помех, является схемотехническое моделирование в среде LTspice. Применительно к маломощным AC/DC-преобразователям, построенным по обратной топологии (flyback), данный метод рассмотрен в [1, 2].

Однако с увеличением выходной мощности возрастает сложность схемотехники ИИП. Так, у AC/DC-преобразователей появляется узел корректора коэффициента мощности (ККМ), что усложняет схемотехническое моделирование преобразователя в целом. ККМ оказывает значительное влияние на амплитуду помех, особенно в диапазоне низких частот. В связи с этим его моделирование является обязательным условием построения модели ИИП средней мощности для анализа кондуктивных помех.

Для получения адекватных результатов моделирования ККМ необходимо добавление в модель индуктивных и емкостных компонентов, включающих паразитные параметры, описывающие поведение

компонентов на различных частотах. В [3] рассмотрено построение схемотехнической модели синфазного дросселя на основе частотных характеристик затухания (вносимых потерь). Однако данный подход не является единственно возможным для экстракции паразитных параметров пассивных компонентов и построения их моделей.

В работе [4] предложен анализ частотных характеристик импеданса силового дросселя ККМ, а также одного из фильтрующих конденсаторов на входе корректора. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) показывают, на каких частотах происходят последовательные и параллельные резонансы компонентов, а также в каком частотном диапазоне их полное сопротивление имеет емкостный или индуктивный характер. Данные сведения позволяют проанализировать необходимые паразитные параметры, что позволит встроить их в модель ККМ для последующей оценки кондуктивных помех.

Силовой дроссель ККМ

С целью добавления в схемотехническую модель ККМ паразитных параметров силового дросселя были выполнены предварительные измерения импеданса в широкой полосе частот с использованием анализатора Боде Ridley Box (рис. 1).

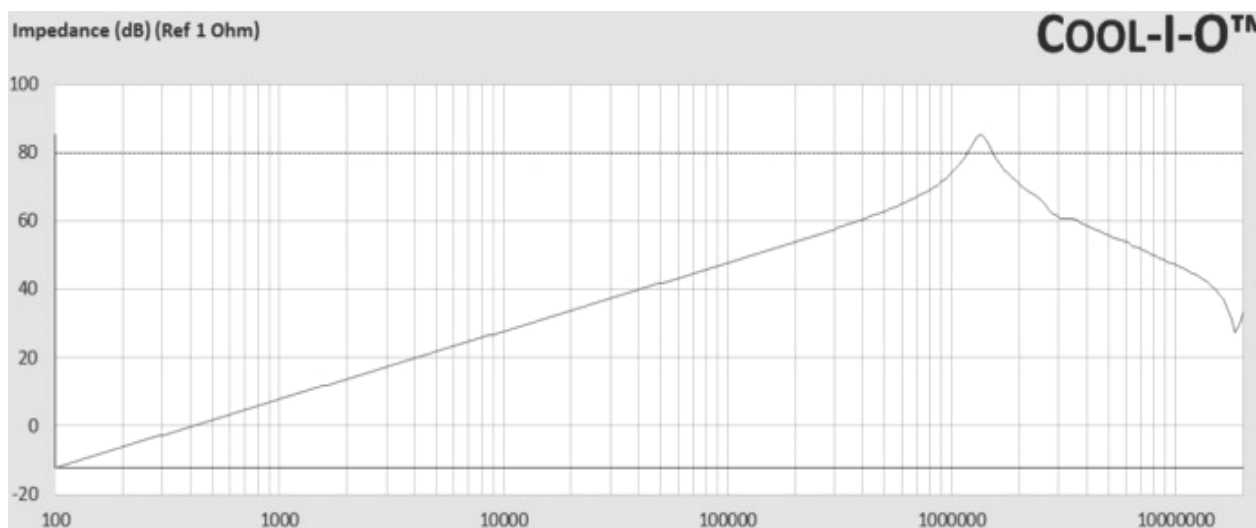


Рис. 1. Частотная характеристика импеданса дросселя ККМ

В данном случае результат представлен в дБ относительно опорного сопротивления R_{ref} , равного 1 Ом. Абсолютное значение полного сопротивления для заданной частоты определяется как

$$Z(f) = \left(10^{\frac{\text{дБ}}{20}} \right) R_{\text{ref}}. \quad (1)$$

Участок характеристики импеданса до частоты резонанса соответствует индуктивному характеру сопротивления. Для определения индуктивности с помощью данного подхода по графику на рис. 1 находятся значения импеданса на частотах 10 и 40 кГц. Полученные значения 27,9 и 40 дБ соответствуют индуктивному сопротивлению X_L 24,86 и 100 Ом. Поскольку индуктивность

$$L = X_L / 2\pi f, \quad (2)$$

то для частот 10 и 40 кГц индуктивность составит 396 и 398 мкГн соответственно. Среднее арифметическое значение индуктивности обмотки составило 397 мкГн. Данное значение добавляется в модель и используется при последующем анализе. Далее, исходя из частоты собственного резонанса, рассчитывается паразитная емкость. Как видно из полученных результатов, на частоте, приблизительно равной 1,35 МГц, присутствует параллельный резонанс. Исходя из формулы Томсона, паразитная емкость дросселя определяется как:

$$C = 1 / 4L(\pi f)^2. \quad (3)$$

В данном случае межвитковая емкость составила 35 пФ. Полученное значение добавляется параллельно в модель обмотки дросселя. Параллельное сопротивление R_p определяет добротность рассматриваемого колебательного контура. Импеданс параллельной резонансной цепи [5]:

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}. \quad (4)$$

Значение R_p определяется на основе импедансного подхода. На частоте резонанса сопротивление

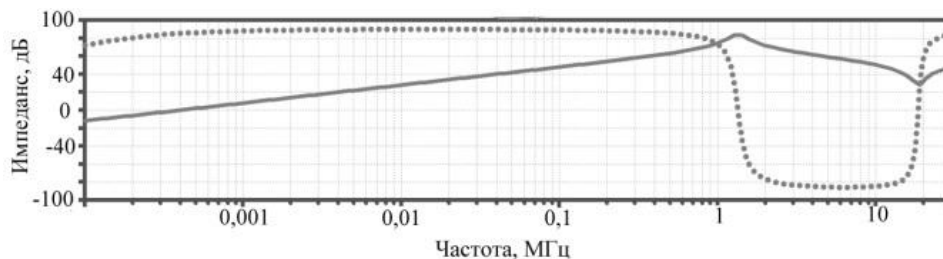


Рис. 3. Результаты моделирования частотной зависимости импеданса дросселя ККМ

Сравнение рис. 1 и 3 показало, что полученные в модели данные соответствуют измеренной частотной характеристике импеданса. Совпадают частоты последовательно и параллельного резонанса, импеданс в диапазоне от 100 Гц до 20 МГц, а также наклоны АЧХ на всех участках указанного диапазона.

колебательного контура имеет чисто активный характер. При этом измеренное значение импеданса составило 85,4 дБ. В результате, используя (1), получаем $R_p = 18,62$ кОм.

Из рис. 1 следует, что на частоте 18,43 МГц присутствует второй (последовательный) резонанс, обусловленный взаимодействием паразитных индуктивности и емкости. Поскольку емкость определена выше, то паразитная индуктивность L_2 :

$$L_2 = 1 / 4C(\pi f)^2. \quad (5)$$

Полученное значение составило 2,1 мкГн. Далее по (1) определяем последовательное сопротивление R_s на частоте второго резонанса. Поскольку на 18,43 МГц получено значение 27,5 дБ, то сопротивление составило 23,7 Ом. Полученные в результате расчетов паразитные индуктивность L_2 и сопротивление R_s должны быть добавлены в модель последовательно с паразитной емкостью. Также в модель следует добавить сопротивление обмотки дросселя по постоянному току. В данном случае оно составило 31,63 мОм.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема для моделирования импеданса дросселя. Сопротивление нагрузки R_3 задано 1 Ом.

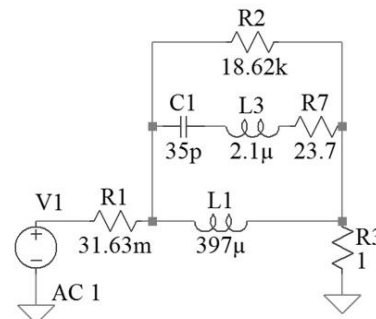


Рис. 2. Эквивалентная схема дросселя

На рис. 3 представлен результат проведенного моделирования импеданса дросселя ККМ. Сплошная линия соответствует изменению импеданса, пунктирная линия – изменению фазы.

Фильтрующий конденсатор ККМ

В отличие от дросселей в конденсаторах первый резонанс является последовательным, а не параллельным. Импеданс последовательной резонансной цепи [5]

$$Z_s = R_s + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (6)$$

Как и в случае с дросселем, проведено предварительное измерение импеданса анализатором Боде. На рис. 4 представлена характеристика пленочного конденсатора JFW0A9474K150000B фирмы JB Capacitors Company номинальной емкостью 0,47 мкФ.



Рис. 4. Импеданс исследуемого конденсатора

Участок характеристики импеданса до частоты резонанса соответствует емкостному характеру сопротивления. Для получения емкости конденсатора с помощью данного подхода определим по рис. 4 значения импеданса на частотах 10 и 40 кГц. Полученные значения 10,63 и -1,45 дБ соответствуют емкостному сопротивлению $X_C = 34$ и 8,46 Ом соответственно. Поскольку емкость конденсатора

$$C_{CAP} = \frac{1}{2\pi f X_C}, \quad (7)$$

то для 10 и 40 кГц емкость C_{CAP} составит 0,468 и 0,47 мкФ соответственно. Среднее арифметическое значение емкости составило 0,469 мкФ.

Частота последовательного резонанса конденсатора, согласно рис. 4, составила 1,73 МГц. Определение эквивалентной последовательной индуктивно-

Компонент расположен на входе в ККМ и выполняет функцию фильтрации помех. Измерения проводились относительно опорного сопротивления R_{ref} , равного 10 Ом.

сти проводится по (5). Было получено значение 18 нГн. Импеданс на частоте резонанса составил -38,78 дБ. Поскольку на данной частоте $R_S = Z_S$, то активное сопротивление R_S определено согласно (1) и составило 0,115 Ом. На рис. 5 представлена эквивалентная схема моделирования импеданса конденсатора. Сопротивление нагрузки $R3$ задано 10 Ом.

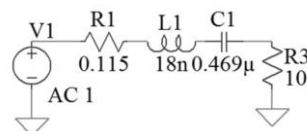


Рис. 5. Эквивалентная схема конденсатора

На рис. 6 представлен результат моделирования импеданса фильтрующего конденсатора ККМ. Обозначение линий соответствует рис. 3.

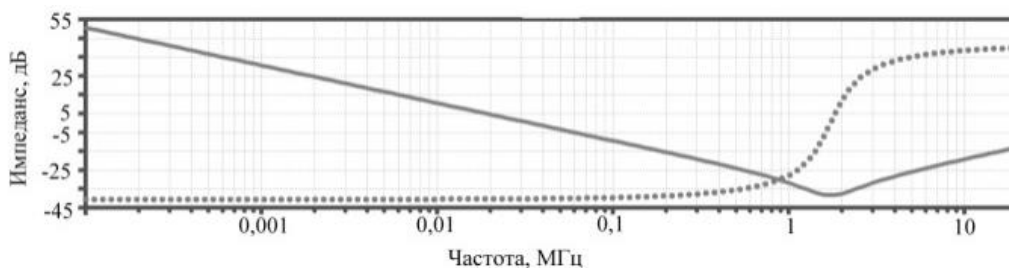


Рис. 6. Результаты моделирования частотной зависимости импеданса фильтрующего конденсатора ККМ

Сравнение рис. 4 и 6 показало, что полученные в модели данные соответствуют измеренному импедансу конденсатора. Совпадают частота последовательного резонанса, а также наклон АЧХ на участке от 100 Гц до резонансной частоты. Колебания импеданса выше резонансной частоты на рис.4 обусловлены паразитными характеристиками измерительной оснастки и в ходе построения модели не учитывались [6].

Заключение

Представленные эквивалентные модели фильтрующего конденсатора и силового дросселя пред-

назначены для моделирования ККМ в составе AC/DC-преобразователя средней мощности в целях обеспечения ЭМС в задачах оценки эмиссии кондуктивных помех. Измерение частотных характеристик импеданса компонентов с последующим вычислением паразитных параметров и добавлением полученных данных в модель LTspice является основной особенностью используемого импедансного подхода. Важным преимуществом такого подхода является сокращение числа измерений, так как практически все необходимые параметры вычисляются на основе измеренных АЧХ. Также данный подход

может быть использован для определения параметров неохарактеризованных пассивных компонентов, на которые отсутствуют полноценные технические описания. Полученные в результате моделирования характеристики дросселя и конденсатора соответствуют реальным характеристикам исследуемых компонентов.

Литература

1. Ромашенко М.А. Методика моделирования кондуктивных помех обратноходового AC/DC-преобразователя / М.А. Ромашенко, А.В. Гудков, О.Ю. Макаров // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 7. – С. 16–20. DOI 10.18127/j00338486-202407-03.

2. Ромашенко М.А. Моделирование силового контура обратноходового AC-DC-преобразователя для оценки уровня кондуктивных помех / М.А. Ромашенко, А.В. Гудков // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XX Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 ноября 2024 г.: в 2 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2024. – Ч. 2. – С. 19–21.

3. Макаров О.Ю. Эквивалентная модель синфазного дросселя в среде LTspice для обеспечения электромагнитной совместимости AC-DC-преобразователей / О.Ю. Макаров, М.А. Ромашенко, А.В. Гудков // Радиотехника. –

2025. – Т. 89, № 7. – С. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202507-05>.

4. Емельянов А. Импедансный подход к анализу индуктивных компонентов // Современная электроника. – 2023. – № 9. – С. 46–49.

5. Trilogy of magnetics. Design guide for EMI Filter design, SMPS and RF circuits // T. Brander, A. Gerfer, B. Rall, H. Zenker. – 4th edition. – Walenbourg Germany: Wurth Elektronik, 2010. – 728 p.

6. Кечиев Л.Н. Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат. Инженерное пособие. – М.: Грифон, 2021. – 416 с.

Ромашенко Михаил Александрович

Д-р техн. наук, проф. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР), Воронежского гос. техн. ун-та
ORCID: 0000-0001-5629-6056
Эл. почта: kipr@vorstu.ru

Гудков Андрей Владимирович

Аспирант, каф. КИПР Воронежского гос. техн. ун-та
Эл. почта: avgdk@mail.ru

Секция 15

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕСПИЛОТНЫЕ СИСТЕМЫ

*Председатель – Шелупанов Александр Александрович,
президент ТУСУР, проф., д.т.н.*

П.Г. Букина, С.С. Харченко

Сравнение алгоритмов сопоставления паттернов ЧОТ в задаче определения психоэмоционального состояния по речевому сигналу

Рассматривается зависимость эмоционального состояния человека от паттерна речевых сигналов, выстраиваемых на основе частот, извлекаемых из аудиозаписей эмоционально окрашенной речи дикторов. Освещаются классические алгоритмы сравнения последовательностей разной длины, а также предложен алгоритм классификации при помощи сопоставления паттернов.

Ключевые слова: анализ речи, оценка психоэмоционального состояния, алгоритм, речевой сигнал, эмоции.

В последние годы значительное внимание уделяется исследованиям, направленным на выявление эмоционального состояния человека на основе анализа речи [1]. Эмоции оказывают влияние на поведенческие реакции и общее состояние организма, что определяет актуальность разработки методов автоматического распознавания эмоций в различных сферах деятельности [2, 3], в частности, имеются перспективы в повышении уровня информационной безопасности за счет своевременного обнаружения социальной инженерии. Использование нейронных сетей дает высокие результаты при решении подобных задач [4], однако требует мощных вычислительных ресурсов, полноты и достаточности размеченных корпусов данных, поэтому в данной статье будет предложен алгоритм классификации аудиосигналов по эмоциям при помощи сравнения паттернов перепадов частоты основного тона (ЧОТ).

Обзор алгоритмов сравнения двух последовательностей разной длины

Поскольку длина аудиосигнала не является константой, паттерн перепадов ЧОТ имеет разную длину в зависимости от продолжительности аудиозаписи. Следовательно, для сопоставления двух паттернов необходимо использовать алгоритмы сравнения последовательностей разной длины [5, 6].

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы (DTW) позволяет сравнивать и выравнивать временные последовательности с учетом отклонений в скорости их протекания. Основная задача DTW – поиск оптимального соответствия между двумя последовательностями за счет минимизации суммарного расстояния между их элементами.

Алгоритм Longest Common Subsequence (LCSS) используется для поиска самой длинной подпоследовательности элементов, которая присутствует в рассматриваемых последовательностях в том же порядке, но без учета непрерывности. Отличие от поиска общей подстроки – допуск разрывов между совпадающими элементами.

Расстояние Левенштейна представляет собой метрику, определяющую минимальное количество операций вставки, удаления или замены символа, необходимых для преобразования одной последовательности в другую. Таким образом, чем меньше расстояние, тем более схожи последовательности.

Алгоритм Edit Distance with Real Penalty (ERP) расширяет классическое редакционное расстояние за счет учета реальных числовых значений и штрафов за несоответствия. Данный алгоритм рассматривает величину разницы между элементами, вводит параметр «gap penalty» (штраф за пропуск элемента), подходит для анализа невыровненных временных рядов.

Алгоритм Edit Distance on Real Sequences (EDR) основан на принципах редакционного расстояния, но адаптирован для работы с вещественными числами. В отличие от ERP данный алгоритм фокусируется на количестве редактирующих операций, а не на величине разницы между значениями. EDR использует бинарную функцию сравнения (совпадение или несовпадение), вводит параметр ϵ – порог совпадения.

Формирование паттернов

В качестве источника данных был выбран датасет «RAVDESS» по причине широкого применения в задачах SER. Набор содержит 1 440 аудиофайлов формата WAV, включает 24 профессиональных актера (12 женщин и 12 мужчин), 8 дискретных эмоций (нейтраль, спокойствие, счастье, грусть, злость, страх, удивление, отвращение), 2 уровня эмоциональной интенсивности (нормальный и сильный).

Для каждого аудиофайла был построен паттерн – последовательность чисел, где каждое число соответствует процентному перепаду ЧОТ.

Для обработки и извлечения последовательности частот использовалась библиотека «Parselmouth», которая взаимодействует с исходным кодом программы «Praat». Для обработки аудиозаписи использовались следующие параметры конфигурации:

- 1) ширина временного окна: 0,01 с;
- 2) максимальная ЧОТ: 500 Гц;
- 3) минимальная ЧОТ: 75 Гц.

Полученный массив частот применялся для расчета процентного изменения ЧОТ на временных промежутках, равных ширине временного окна. Процентная разница рассчитывалась между максимальным и минимальным значениями в пределах одного временного окна.

На рис. 1 представлена блок-схема формирования паттернов.

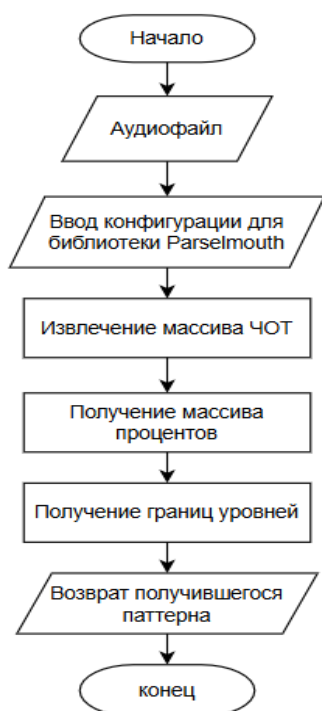


Рис. 1. Блок-схема процесса получения паттерна

Также для формирования паттерна использовались заранее определенные границы уровней принадлежности процентных перепадов при помощи алгоритма, представленного на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема расчета границ уровней

Граничные значения рассчитывались с учетом всех аудиозаписей набора данных. Паттерн для каж-

дой аудиозаписи был сформирован для уровней в промежутке от 5 до 20 и записан в базу данных (БД). В БД все паттерны разбиты по эмоциям, а внутри каждой эмоции – по уровням.

Реализация алгоритма классификации

Суть разработанного алгоритма классификации состоит в сравнении тестового паттерна со всеми паттернами базы данных при помощи классических алгоритмов сравнения.

На рис. 3 представлена блок-схема предложенного алгоритма классификации.

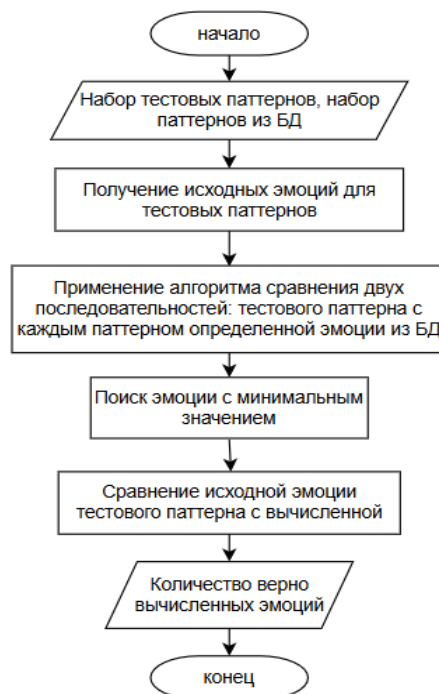


Рис. 3. Блок-схема процесса классификации

Данный алгоритм имеет недостаток, связанный с поиском эмоции с минимальным значением, а именно с нахождением нескольких эмоций с одинаковым показателем. Следовательно, были реализованы условия для решения проблемы: при определении нескольких эмоций рассчитывается количество паттернов для выявленных эмоций, после чего выбирается эмоция с большим количеством. Если же количество паттернов совпало, то происходит переход к следующему минимальным значениям определенных на предыдущем этапе эмоций.

Стоит учесть, что для алгоритма LCSS необходимо искать наибольшее значение.

Тестирование алгоритмов

Изначально для тестирования было взято по 10 паттернов на каждую эмоцию с использованием 10 граничных уровней, опираясь на рекомендации из исследования [7].

Наибольшее количество верно распознанных эмоций показали алгоритмы Левенштейна и EDR, однако их доля составила 0,25 от общего объема тестовых данных.

Следовательно, было решено получить паттерны при разной ширине окна в диапазоне от 0,01 до

0,1 с. Также была выдвинута гипотеза об улучшении результатов при уменьшении количества эмоций, поэтому количество было сокращено до 5: happiness, fear, calmness, disgust, anger. Количество тестовых паттернов было увеличено до 40 по каждой эмоции.

В табл. 1 представлены наиболее высокие доли успешных распознаваний для каждого алгоритма.

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритмов

Алгоритм	Доля успешных распознаваний	Количество уровней	Ширина временного окна
DTW	0,35	14	0,04
LCSS	0,36	6	0,02
		10	
		14	
		7	0,07
EDR	0,34	5	0,02
		6	0,03
ERP	0,33	19	0,07
Левенштейн	0,38	8	0,03

Оценка результатов

В исследовании [7] рассматривался алгоритм DTW при использовании паттернов, сформированных с шириной временного окна 0,01 для 5 эмоций. Также в данной работе алгоритм классификации предусматривал добавление распознанного паттерна в БД для увеличения размера. Помимо этого, отдельно тестировались аудиофайлы с высокой и нормальной интенсивностью. В табл. 2 представлены доли успешных распознаваний исследования.

Таблица 2

Результаты исследования

Уровень	Доля успешных распознаваний
5	0,3
6	0,31
7	0,32
8	0,32
9	0,32
10	0,32
11	0,32
12	0,31
13	0,3
14	0,29
15	0,28

Полученные результаты при помощи разработанного алгоритма оказались выше представленных в упомянутой работе. Расстояние Левенштейна показало наиболее высокие значения в сравнении с остальными алгоритмами. Также стоит выделить влияние ширины окна на результаты, так как наиболее высоких удалось добиться при ширине 0,02–0,04 с. В сравнении с нейронными сетями рассмотренные алгоритмы уступают по точности [8, 9].

Заключение

Таким образом, удалось выявить зависимость параметров для формирования паттернов на результат работы алгоритмов, определить наиболее точный классический алгоритм из представленных, а также подтвердить нецелесообразность использования классических алгоритмов при решении задачи определения эмоций в речевом сигнале за счет существования нейросетевых моделей.

Литература

1. Меринов А.А. Исследование способности человека к определению эмоций по спектральному представлению звуковых записей голоса / А.А. Меринов, Р.Н. Абдуллин, С.С. Харченко // Матер. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – Ч. 2. – С. 296–298.
2. Назарова Е.К. Влияние психики на производительность труда // Universum: психология и образование. – 2024. – № 7. – С. 53–56.
3. Никифоров А.А. Разработка модуля распознавания эмоций разговора кол-центра с использованием рекуррентных искусственных нейронных сетей для выявления нежелательного контента // Вестник науки. – 2023. – № 7. – С. 226–231.
4. Букина П.Г. Краткий обзор методов определения эмоционального состояния человека по речевому сигналу / П.Г. Букина, С.С. Харченко // Матер. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2024. – Ч. 2. – С. 214–216.
5. Боровской А.А. Обзор алгоритмов оценки схожести речевых сигналов // Перспективы развития фундаментальных наук. – 2023. – Т. 7. – С. 28–30.
6. Траулько М.В. Программная реализация нечеткого поиска текстовой информации в словаре с помощью расстояния Левенштейна // Форум молодых ученых. – 2017. – № 12 (16). – С. 1827–1831.
7. Орлов Б.О. Определение психоэмоционального состояния диктора методом извлечения и оценки паттернов речевого сигнала с использованием алгоритма DTW / Б.О. Орлов, С.С. Харченко // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР: в 3 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – Ч. 3. – С. 23–26.
8. Large raw emotional dataset with aggregation mechanism / V. Kondratenko, A. Sokolov, N. Karpov, O. Kutuzov, N. Savushkin, F. Minkin // ArXiv (Cornell University). – 2022.
9. Лемаев В.И. Автоматическая классификация эмоций в речи: методы и данные / В.И. Лемаев, Н.В. Лукашевич // Litera. Nota bene. – 2024. – № 4. – С. 159–173.

Букина Полина Германовна

Студентка каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: bukina.polina2014@gmail.com

Харченко Сергей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. БИС ТУСУРа
Эл. почта: kss@fb.tusur.ru

С.А. Литовкин, С.А. Давыденко

Классификация сгенерированной речи с использованием методов машинного обучения

Рассматривается возможность использования различных методов машинного обучения для классификации сгенерированной речи. В качестве данных использовались несколько наборов данных: ASVspoof 2019 Dataset, MLAAD и FOR. Для извлечения аудиохарактеристик использовались классические методы, такие как MFCC и различные формы спектрограмм. Полученные результаты показывают, что рассматриваемые методы машинного обучения способны классифицировать сгенерированную речь, которая была представлена в обучающей выборке, но они показывают плохие результаты при классификации ранее не известных методов для генерации речи. Полученные результаты показывают проблемы использования данных методов машинного обучения в реальных системах классификации сгенерированной речи.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственный интеллект, человеческая речь, аудиохарактеристики, классификация, набор данных, сгенерированная речь.

Методы генерации речи сейчас актуальны как никогда. Благодаря развитию искусственного интеллекта появилась возможность быстро и качественно создавать речь, основанную на голосе любого человека. Чаще всего это используется для автоматического озвучивания аудиокниг, видеоконтента и озвучивания текстовых сообщений, но это также могут использовать злоумышленники. Например, использовать голос и речь знаменитых людей для обмана в социальных сетях, распространять лживую информацию от лица политиков или губернаторов, а также подделывать голоса знакомых или родственников для проведения мошеннических действий.

Существует множество проектов по детектированию сгенерированной речи как от энтузиастов, так и от коммерческих компаний. Многие проекты используют как методы машинного обучения, например случайный лес, так и методы глубокого обучения, например сверточные нейронные сети. Однако современные научные работы в области определения сгенерированной речи используют преимущественно методы глубокого обучения для классификации. Что оставляет некую неизвестность в эффективности методов машинного обучения при классификации современных методов генерирования речи.

Данная работа направлена на изучение возможности классификации сгенерированной речи с помощью методов машинного обучения.

Используемые наборы данных

В качестве сгенерированной и настоящей речи использовались 3 набора данных:

- ASVspoof 2019 Dataset [1] – данный набор данных содержит больше 300 ч сгенерированной и естественной речи. Речь генерировалась с использованием более 30 различных методов. Для записи естественной речи привлекалось 93 диктора. Набор данных разделён на 3 части: обучающую, тестовую и валидационную. В данной работе использовались обучающая и валидационная части.

- MLAAD [2] – набор данных, который содержит 378 ч сгенерированной речи на 38 языках. Для его создания использовалось 82 метода генерации

речи. Данный набор данных не содержит реальную человеческую речь, по этой причине он был использован частично для увеличения количества анализируемых методов в обучающем наборе данных, а также для добавления аудиозаписей на других языках для разнообразия.

- Fake-or-Real (FoR) [3] – содержит 198 000 высказываний реальной и сгенерированной речи. Данный набор данных использовался только в качестве реальной человеческой речи для расширения обучающего набора данных.

Все аудиоданные были перекодированы с частотой дискретизации 16 кГц, средняя продолжительность аудио варьирует от 2 до 7 с. Общее число использованных аудио в обучающей выборке равняется 22 680 сгенерированных записей на 20 596 настоящих, в тестовой выборке 9 616 на 8 920, в валидационной 63 882 на 7 355 записей.

Предобработка данных

В качестве методов извлечения признаков для обучения использовались:

- мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) – это спектральная огибающая звука;
- хромограмма (Chroma) – это представление частотных характеристик в виде музыкального тона;
- мел-спектрограмма (Mel-spectrogram) – разновидность спектрограммы, которая нормирована по мел-частотам;
- логарифмическая мел-спектрограмма (Log-mel-spectrogram) – это мел-спектрограмма, к которой было применено логарифмическое преобразование;
- MFCC_Chroma – это объединение признаков мел-частотных кепстральных коэффициентов и хромограмм.

Все аудиоданные предварительно резались на фрагменты по 1 с и уже затем подавались на функцию извлечения признаков.

Используемые методы машинного обучения

В данной работе рассматриваются 6 методов машинного обучения для классификации, которые часто использовались в работах, связанных с классификацией сгенерированной речи [4–6]: стохастический градиентный спуск, метод опорных векторов, метод опорных векторов с ядром, метод опорных векторов с ядром, метод опорных векторов с ядром, метод опорных векторов с ядром.

ческий градиентный спуск (SGD), Perceptron, MultinomialNB, PassiveAggressiveClassifier, случайный лес (RF), и К ближайших соседей (KNN).

Полученные результаты

В качестве метрики для оценивания точности классификации использовалось f1-score, так как валидационный набор данных плохо сбалансирован.

Результаты классификации сгенерированной речи представлены в таблице. Полученные результаты показывают, что представленные классификаторы способны определять сгенерированную речь, но только ту, которая была представлена в обучающей выборке. Ранее не известные данные не поддаются классификации, вследствие чего происходит угадывание класса. Лучшие результаты на тестовом наборе данных были получены с использованием в каче-

стве функции извлечения признаков MFCC, хуже всего себя показали хромограммы. Авторы валидационных данных [1], а также другие исследователи смогли достичь точность, близкую к 3.92% Equal Error Rate (EER) с использованием методов глубокого обучения и MFCC.

Невозможность классифицировать неизвестные способы генерации речи ставит методы машинного обучения в невыгодное положение по сравнению с методами глубокого обучения, которые хоть и требуют больших вычислительных затрат, не имеют данного недостатка. Чтобы представленные методы показывали высокие результаты, требуется постоянно добавлять новые методы генерации в набор данных и переобучать модели, что выливается в большие временные затраты.

Результаты классификации сгенерированной речи

Классификаторы	Тип данных	Способ извлечения признаков				
		MFCC	Chroma	Mel-spectrogram	log_mel-spectrogram	MFCC CHROMA
SGDClassifier	Тестовые	0,80	0,51	0,69	0,73	0,73
	Валидационные	0,48	0,43	0,39	0,44	0,48
Perceptron	Тестовые	0,73	0,51	0,64	0,64	0,66
	Валидационные	0,48	0,47	0,39	0,48	0,47
MultinomialNB	Тестовые	0,68	0,56	0,67	0,60	0,68
	Валидационные	0,31	0,44	0,41	0,44	0,30
PassiveAggressiveClassifier	Тестовые	0,81	0,55	0,65	0,71	0,75
	Валидационные	0,47	0,47	0,39	0,43	0,48
RF	Тестовые	0,71	0,62	0,66	0,65	0,73
	Валидационные	0,40	0,47	0,42	0,41	0,38
KNN	Тестовые	0,79	0,61	0,71	0,75	0,79
	Валидационные	0,45	0,49	0,42	0,46	0,46

Заключение

Полученные результаты демонстрируют неспособность классических методов машинного обучения классифицировать сгенерированную речь, которая не была представлена в обучающей выборке.

Для детектирования современных методов генерации речи рекомендуется использовать современные методы искусственного интеллекта, такие как сверточные или рекуррентные нейронные сети.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015).

Литература

1. Nautsch A. et al. ASVspoof 2019: spoofing countermeasures for the detection of synthesized, converted and replayed speech // IEEE Transactions on Biometrics, Behavior and Identity Science. – 2021. – No. 2 (3). – P. 252–265.
2. Müller N.M. et al. MLAAD: The Multi-Language Audio Anti-Spoofing Dataset // IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – 2024. – P. 1–7.
3. Reimao R. A Dataset for Synthetic Speech Detection Timisoara / R. Reimao, V. Tzerpos. – Romania: IEEE, 2019. – P. 1–10.

4. Singh A.K. Detection of AI-Synthesized Speech Using Cepstral & Bispectral Statistics / A.K. Singh, P. Singh // IEEE 4th International Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR). – 2021. – P. 412–417.

5. Villalba J. et al. Spoofing detection with DNN and one-class SVM for the ASVspoof 2015 challenge ISCA // Proc. Interspeech. – 2015. – P. 2067–2071.

6. Leon P.L.D. Synthetic speech discrimination using pitch pattern statistics derived from image analysis ISCA / P.L.D. Leon, B. Stewart, J. Yamagishi // Proc. Interspeech. – 2012. – P. 370–373.

Литовкин Сергей Александрович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: lsa@fb.tusur.ru

Давыденко Сергей Андреевич

Аспирант каф. ТУСУРа
Эл. почта: dsa@fb.tusur.ru

А.Ю. Тимохович, А.И. Гуляев

Правовое регулирование средств криптографической защиты информации в Российской Федерации

Рассматривается система правового регулирования средств криптографической защиты информации (СКЗИ) в Российской Федерации как комплексный механизм обеспечения информационной безопасности. Проводится анализ основных нормативных документов, регулирующих разработку, производство, реализацию и эксплуатацию криптографических средств. Детально рассматривается жизненный цикл криптографических ключей с определением правовых норм на каждом этапе жизненного цикла, включая этапы от генерации до последующего уничтожения.

Ключевые слова: СКЗИ, криптографическая защита, правовое регулирование, жизненный цикл, ФСБ, ГОСТ, электронная подпись, информационная безопасность.

В эпоху цифровизации, когда информация становится ключевым активом, ее защита приобретает стратегически важное значение. Криптографические средства защиты информации являются фундаментом обеспечения конфиденциальности, целостности данных. Законодательство регулирует все этапы жизненного цикла СКЗИ от разработки и производства до реализации и эксплуатации, игнорирование норм может привести к серьезным правовым последствиям, кроме того, без учета требований законодательства будет невозможно получить сертификат соответствия требованиям – без него область применения СКЗИ будет ограничена, что снизит количество потенциальных заказчиков. Таким образом, тщательный анализ правовой базы является не формальностью, а необходимостью при работе с криптографическими средствами защиты информации.

Законодательство в сфере криптографической защиты информации

Положение ПКЗ–2005 [1] (Приказ ФСБ № 66) является основополагающим подзаконным актом, регулирующим правила обращения со средствами криптографической защиты информации на всех этапах их жизненного цикла: от их разработки и производства до реализации и эксплуатации.

Данный документ определяет понятие «шифровальное средство»: это не только система, реализующая криптографические алгоритмы, но и ключевые документы, средства их изготовления, а также средства электронной подписи, имитозащиты и кодирования.

Приказ ФАПСИ № 152 [2] фокусируется на обеспечении строгой дисциплины при работе с шифровальными средствами, по сути является первоисточником для регламентации организационных мер безопасности, связанных с эксплуатацией СКЗИ.

Постановление Правительства РФ № 313 [3] регулирует лицензирование деятельности, связанной с криптографическими средствами. Определяет, какие виды работ и услуг подлежат лицензированию, и устанавливает требования к соискателю лицензии. Согласно данному документу, для получения лицензии необходимо доказать способность выполнять требования, установленные ПКЗ–2005, Приказом ФАПСИ № 152 и другими документами.

ФЗ-63 [4] является ключевым документом, регулирующим отношения в сфере использования электронной подписи (ЭП), определяя ее правовой статус и юридическую силу, устанавливает требования к средствам электронной подписи, регулирует деятельность удостоверяющих центров. Определяет три вида электронной подписи:

- простая электронная подпись – это базовый вариант ЭП – аналог устного согласия. Она не защищена криптографическими алгоритмами и является набором символов, знание которых подтверждает подлинность субъекта. Пример – логин и пароль;

- неквалифицированная электронная подпись – цифровой аналог печати. Она создается с применением криптографических алгоритмов, позволяет не только идентифицировать подписанта, но и убедиться в целостности подписанного документа;

- квалифицированная электронная подпись – полноценный аналог собственноручной подписи. Ее можно получить исключительно в аккредитованных удостоверяющих центрах. Ключ проверки указывается в квалифицированном сертификате.

Приказ ФСБ № 795 [5] утверждает требования к сертификату ключа квалифицированной электронной подписи, включает обязательные поля:

- для физического лица – ФИО, СНИЛС, ИНН;
- для юридического лица – название, ОГРН, ИНН, местонахождение;
- сведения об удостоверяющем центре;
- способ идентификации отправителя;
- ключ проверки электронной подписи с указанием сведений о криптографических алгоритмах и средствах ЭП.

Приказ ФСБ № 796 [6] регулирует безопасность электронной подписи и работу удостоверяющих центров (УЦ). Устанавливает детальные требования к защите информации, включая классификацию угроз, меры контроля и обязательность выполнения государственных стандартов. Разделяет средства ЭП и УЦ на классы, класс определяет, от каких атак должно быть защищено СКЗИ. Ниже приведена сравнительная таблица, в которой представлены основные функции каждого из нормативных документов.

Основные функции нормативных документов

Документ	Сфера регулирования
ПКЗ–2005	Полный жизненный цикл СКЗИ
Приказ ФАПСИ № 152	Организация работы с СКЗИ
ПП РФ № 313	Лицензирование деятельности с СКЗИ
ФЗ-63	Правовая основа электронной подписи
Приказ ФСБ № 795	Структура сертификатов электронной подписи
Приказ ФСБ № 796	Классификация средств электронной подписи

Жизненный цикл криптографического ключа

Для работы СКЗИ также необходимо учитывать требования к криптографическим ключам на каждом этапе их жизненного цикла. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012 содержит основные этапы жизненного цикла криптографических ключей:

Генерация ключа. Данный этап предполагает создание криптографических ключей с обеспечением максимальной непредсказуемости для потенциального нарушителя, регулируется документами:

- ГОСТ Р 34.10–2012 – устанавливает требования к генерации ключевых пар для электронной подписи;
- ГОСТ Р 34.12–2015 – устанавливает параметры генерации ключей для блочных шифров;
- ПКЗ–2005 – регламентирует общие требования к процедурам генерации ключевой информации.

Генерация и получение сертификатов открытых ключей. На этом этапе обеспечивается связывание сгенерированных открытых ключей с идентификационными данными их владельцев через механизм сертификации. На данном этапе происходит создание запроса на сертификат, проверка подлинности заявителя удостоверяющим центром, и формирование сертификата со включением всех обязательных полей. Этап регулируется следующими документами:

- ФЗ № 63 – устанавливает правовые основы использования сертификатов;
- приказ ФСБ № 795 – детально регламентирует форму и содержание квалифицированных сертификатов;
- приказ ФСБ № 796 – устанавливает требования к центрам сертификации (применимо, если идет работа с квалифицированной электронной подписью).

Рассылка ключей пользователям. На данном этапе сгенерированный ключ передается владельцу. Формат транспортного ключевого контейнера описан в Р 1323565.1.041–2022, данный стандарт предназначен для гарантии конфиденциальности и целостности ключей подписи и сертификатов ключей, обеспечивая защищенную и надежную передачу. Передавать ключ можно на ключевом носителе, удовлетворяющем требованиям ПКЗ–2005.

Хранение ключей. Для обеспечения долгосрочного безопасного хранения нужно использовать ключевой носитель, выполняющий требования ПКЗ–2005. Формат хранения основывается на Р 50.1.110–2016.

Использование. На данном этапе ключ используется для шифрования или расшифровки, либо для работы с электронной подписью. При работе с квалифицированной электронной подписью использование национальных стандартов является обязательным [4], а при шифровании и расшифровке файлов использование национальных стандартов является рекомендацией [1].

Электронной подписью подписывается хеш-сумма документа, полученная алгоритмом, описанным в ГОСТ Р 34.11–2012, сами же процедуры формирования и проверки электронной подписи определяются в ГОСТ Р 34.10–2012. При шифровании либо расшифровании файла применяются алгоритмы ГОСТ Р 34.12–2015, используя режимы работы, описанные в ГОСТ Р 34.13–2015.

Замена ключа. Состоит из аннулирования сертификата и последующего «отката» к первому этапу жизненного цикла. Р 1323565.1.023–2022 описывает процедуру аннулирования сертификатов.

Аннулирование ключа. Данный этап актуален для работы с ЭП, в отличие от предыдущего отсутствует «откат» к первому этапу.

Для наглядного представления взаимосвязи между этапами и документами, регламентирующими их, была разработана схема, представленная на рис. 1.

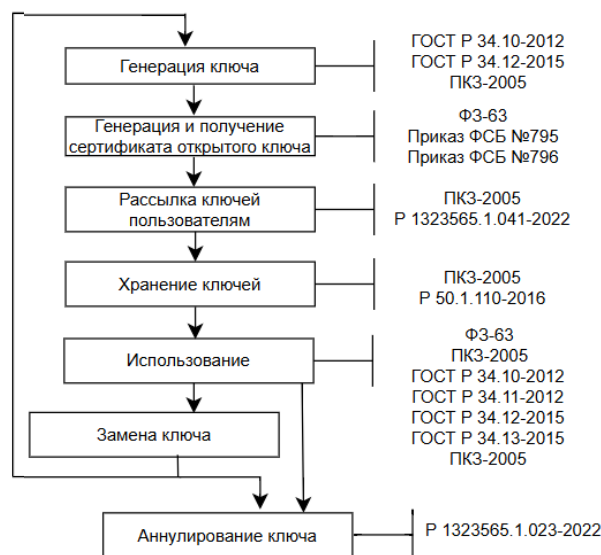


Рис. 1. Жизненный цикл ключа

Литература

1. Приказ ФСБ России от 9 февраля 2005 года № 66 «Об утверждении Положения о разработке, производстве, реализации и эксплуатации шифровальных (криптографических) средств защиты информации (Положение ПКЗ–2005)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://base.garant.ru/187947/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/#block_1000, свободный (дата обращения: 10.08.2025).
2. Приказ ФАПСИ от 13 июня 2001 г. № 152 «Об утверждении Инструкции об организации и обеспечении безопасности хранения, обработки и передачи по каналам связи с использованием средств криптографической защи-

ты информации с ограниченным доступом, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://org-srcn5-efremov-r71.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/10/15/6_attach.pdf, свободный (дата обращения: 13.08.2025).

3. Постановление Правительства РФ от 16.04.2012 № 313 (ред. от 28.08.2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_128739/, свободный (дата обращения: 14.08.2025).

4. Федеральный закон № 63 «Об электронной подписи» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102146610>, свободный (дата обращения: 11.08.2025).

5. Приказ ФСБ РФ от 27 декабря 2011 г. № 795 «Об утверждении Требований к форме квалифицированного сертификата ключа проверки электронной подписи (с изменениями и дополнениями)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70133464/>, свободный (дата обращения: 12.07.2025).

6. Приказ ФСБ России от 27 декабря 2011 г. № 796 «Об утверждении Требований к средствам электронной подписи и Требований к средствам удостоверяющего центра» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70139150/>, свободный (дата обращения: 14.09.2025).

Тимохович Андрей Юрьевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: andrey.timokhovich@gmail.com

Гуляев Алексей Игоревич

Ст. преп. каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: gai@fb.tusur.ru

УДК 004.93'12

М.Е. Исаева, П.Ю. Лаптев, Е.В. Николаева

Решение задачи сегментации фотографий новорождённых с помощью нейронной сети YOLO11

Даны описание и результаты решения проблемы сегментации фотографий новорождённых с помощью нейронной сети YOLO. Задача сегментации решалась в два этапа обученными независимо друг от друга нейронными сетями YOLOv11.

Ключевые слова: компьютерное зрение, сегментация изображений, нейронная сеть, новорождённый, YOLO.

В современном мире в различных областях весьма актуальна задача распознавания различных образов на фотографиях. Распознавание какого-либо объекта на изображении – это классическая задача компьютерного зрения.

С развитием технологий и возможностей задачи сегментации изображений (разделения изображения на отдельные группы пикселей) начали приобретать прикладной характер. Например, одной из таких прикладных задач является сегментация фотографий новорождённых, где требуется разделить пиксели изображений новорождённых на два класса: «фон» и «кожа новорожденного». Решение этой задачи позволит сделать первые шаги в цифровизации медицины и автоматизации работы медицинского персонала в родильных домах и детских больницах.

Нейронная сеть YOLO

YOLO (You Only Look Once) – это одна из самых популярных архитектур нейронных сетей для задачи обнаружения объектов на изображениях или видео. Основная идея YOLO – выполнять детекцию (обнаружение объекта) за один проход по изображению, что делает эту модель очень быстрой по сравнению с другими альтернативами.

У YOLO есть множество версий, а самая первая версия (YOLOv1) вышла в 2015 г. в рамках статьи [1]. На тот момент YOLOv1 решала только задачу обнаружения объектов на изображении.

На текущий момент последней версией является YOLOv11, которая появилась в сентябре 2024 г. Данная версия уже способна решать задачи классификации, сегментации, отслеживания объектов на видео и множество других задач. Работа велась с моделью YOLO11s, предварительно обученной на наборе данных COCO для сегментации изображений. Импортированная модель была обучена на собранном наборе данных.

Набор данных

Набор данных состоит из фотографий новорождённых, полученных в рамках официального сотрудничества с родильными домами. Фотофиксация производится с помощью мобильных телефонов. На момент обучения модели YOLO11s набор данных содержал 1 320 изображений (обновляется ежедневно).

Для работы с нейронной сетью требовалось получить маски обучающих изображений. На основе статей [2–4] была предпринята попытка автоматизи-

рованного получения масок изображений, однако из-за неоднородного фона (наличие складок; теней; засветов; ярких цветных объектов розовых, красных и желтых цветов) описанные в статьях методы не подошли.

Для обучения из собранного набора данных были выбраны и размечены 40 изображений. Разметка происходила вручную с помощью электронного ресурса CVAT (Computer Vision Annotation Tool) [5]. Обучение модели длилось 500 эпох.

Результаты

После обучения была получена модель, имеющая оценки точности по разным метрикам (табл. 1). Результат работы модели можно увидеть на рис. 1.

Таблица 1

Значения метрик точности обученной модели

Mask (P)	R	mAP50	mAP50-95
0,856	0,695	0,709	0,588



Рис. 1. Результат работы обученной модели YOLO11s

На рис. 1 можно увидеть, что модель не на всех фотографиях обнаружила новорождённого. К тому же точность работы нейронной сети неудовлетворительна. Довольно часто модель подсвечивала как кожу новорождённого участки белой квадратной палитры на туловище, что недопустимо. Более высоких показателей точности достичь не удалось.

Поэтому было принято решение упростить задачу для модели путём разбиения процесса сегментации на два этапа:

1) найти на изображении новорожденного и захватить область его туловища и голову (вместе с белой квадратной областью);

2) исключить из выделенной зоны белую квадратную область.

Для реализации каждой из подзадач было принято решение обучить по одной модели, каждая из которых будет выполнять свою часть задачи сегментации. Для обучения моделей было переразмечено 40 изображений. В результате создано два вида разметки (масок):

1) разметка, где выделено туловище и голова новорождённого с белой квадратной областью (рис. 2, а);

2) разметка, где выделены только белые квадратные области (рис. 2, б).

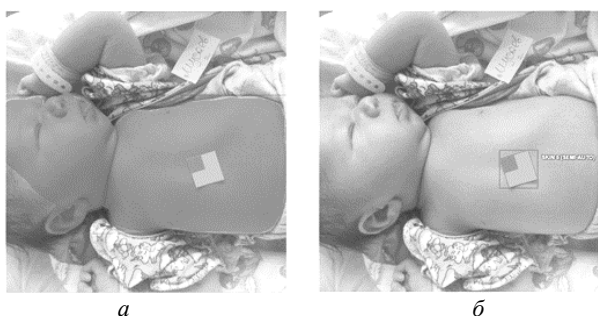


Рис. 2. Маска туловища и головы новорождённого с белой квадратной областью – а; маска, подсвечивающая белые квадратные области, – б

Далее было запущено независимо друг от друга обучение моделей YOLO11s: одна модель обучалась на наборе масок по рис. 2, а, другая – по рис. 2, б. Длительность обучения составила 500 эпох.

Для удобства восприятия обученные модели были обозначены следующим образом: модель I и модель II. Модель I решает первую подзадачу сегментации (выделяет область туловища и головы новорождённого), а модель II решает вторую подзадачу сегментации (выделяет белые квадратные области). Модели применяются последовательно друг за другом следующим образом:

1) модель I выделяет область туловища и головы новорождённого;

2) производится обрезка оригинального изображения по выделенной моделью I области;

3) обрезанное изображение поступает на вход модели II;

4) модель II выделяет белые квадратные области;

5) производится вырезание из изображения выделенной моделью II области.

В итоге получается сегментированное изображение новорождённого, где отсутствуют посторонние области.

Оценки точности обученных моделей по разным метрикам можно увидеть в табл. 2. Результат

последовательной работы моделей представлен на рис. 3, 4.

Таблица 2

Значения метрик точности обученных моделей

Название модели	Mask (P)	R	mAP50	mAP50-95
Модель I	0,979	1	0,995	0,919
Модель II	0,998	1	0,995	0,912
Среднее значение	0,9885	1	0,995	0,9155

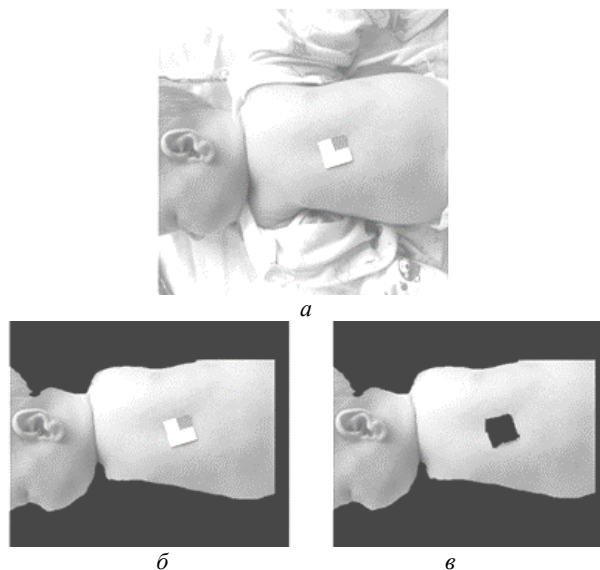


Рис. 3. Исходное изображение из набора данных – а; результаты применения моделей и этапы решения задачи сегментации фотографии новорожденного: I, промежуточный, – б; II, финальный, – в

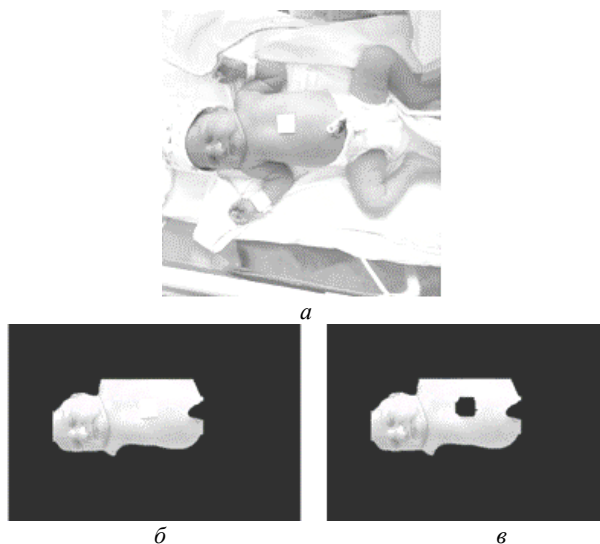


Рис. 4. Оригинальное изображение из набора данных – а. Результат работы моделей и этапы решения задачи сегментации фотографии новорожденного: I, промежуточный, – б; II, финальный, – в

Таким образом, обученные нейронные сети YOLO11s поэтапно сегментируют изображения новорождённых. Сначала выделяется область туловища и головы ребёнка. Затем выделяется и исключается белая квадратная область. В результате задача сегментации фотографий новорождённых может быть успешно решена в два этапа.

Результаты исследования могут быть применены в области биомедицинской сегментации.

Литература

1. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 779–788.
2. Рысюков М.И. Исследование методов сегментации цветных изображений / М.И. Рысюков, К.Н. Сорокин // Сборник матер. науч.-практ. конф. «Современные тенденции инженерного образования». – СПб, 2022. – С. 247–251.
3. Воротнев Д.В. Разработка комплексного бинарного классификатора на основе гом-кривых для сегментации кожи на изображении / Д.В. Воротнев, Р.В. Голованов // Сб. избранных статей по матер. науч. конф. ГНИИ «Нацразвитие», Санкт-Петербург, сентябрь 2018. – С. 88–95.
4. Шмелев И.А. Использование сегментации цветных изображений на основе кластеризации по методу К-средних при решении задач осмотра и анализа возвращаемых культур / И.А. Шмелев, С.И. Рыженков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – СПб.: НИЦ МС, 2019. – № 3. – С. 121–123.

5. Computer Vision Annotation Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cvat.ai/>, свободный (дата обращения: 13.05.2025).

Исаева Маргарита Евгеньевна

Аспирант каф. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: ime@fb.tusur.ru

Лаптев Павел Юрьевич

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Эл. почта: lpu@fb.tusur.ru

Николаева Елена Владимировна

Рук. ДНК им. П.А. Чихачева
Кемеровского государственного ун-та (КемГУ)
Эл. почта: Nevkem@yandex.ru

Д.В. Старосельцева, Р.В. Солоха, П.Ю. Лаптев

Интеллектуальная система по детектированию печатей в документах на основе свёрточных нейронных сетей

В ходе выполнения исследования был создан программный модуль, способный с высокой точностью осуществлять поиск и определение типа печатей на изображениях документов. Итоговый программный модуль включает в себя два подмодуля, выполняющих две задачи: детектирование печатей и определение их типа. Оба подмодуля используют свёрточные нейронные сети, а именно YOLOv11 для детектирования печатей и ResNet-18 для определения их типа. Итоговые точности подмодулей детектирования и определения типа печатей составили 0,92 и 0,91 соответственно при проверке на изображениях реальных документов. Общая точность модуля составила 0,98, что говорит о высокой практической применимости его в реальных условиях.

Ключевые слова: нейронные сети, YOLOv11, ResNet-18, документы, печати, детектирование, классификация.

В условиях активного распространения электронного документооборота вопросы защиты информации приобретают первостепенное значение. Наряду с техническими каналами утечек данных серьёзную угрозу представляют несанкционированное копирование, пересылка или публикация конфиденциальных документов. В подобных ситуациях ключевую роль играет наличие печатей и штампов, которые несут информацию о статусе документа, его принадлежности к определённой организации или уровне секретности.

Автоматическое определение печатей на изображениях позволяет формировать дополнительный слой защиты, обеспечивая мониторинг циркуляции документов и своевременное выявление фактов их возможного распространения за пределы допустимой среды.

Актуальность данной задачи обусловлена растущими требованиями в сфере информационной безопасности к системам предотвращения утечек данных (DLP-системы). Современные механизмы защиты документов должны уметь не только анализировать текстовое содержимое, но и выявлять визуальные атрибуты, такие как печати или штампы. При этом существующие традиционные методы обработки изображений часто не справляются с большим разнообразием печатей, изменениями их формы, цвета и качества сканирования или фотографирования.

В этих условиях использование нейронных сетей становится оправданным и перспективным подходом. Благодаря способности извлекать сложные закономерности из визуальных данных нейросетевые модели демонстрируют высокую устойчивость к шумам, вариативности печатей и различным условиям получения изображений.

Целью данной работы становится разработка интеллектуальной системы для автоматического детектирования и определения типов печатей на изображениях документов с применением технологий нейронных сетей. В случае достижения положительных результатов, данный модуль сможет быть имплементирован в реальные DLP-системы для понижения вероятности утечки документов организации.

Набор данных

В качестве обучаемых данных для предлагаемого программного модуля, основанного на нейронных сетях, выступают изображения двух типов: изображения распечатанных документов, полученных с помощью сканера или камеры, а также изображения разных печатей трёх типов – круглые, прямоугольные (штампы) и треугольные. При этом стоит отметить, что изображения документов могут содержать как несколько печатей, так и ни одной. Данное условие необходимо для корректного обучения модели детектирования печатей на самих документах. Все же изображения отдельных печатей состоят из сегментов полученных с имеющихся изображений документов.

Модель определения типа печатей сможет более точно выделять скрытые закономерности реальных печатей, которые могут использоваться в документах. Однако поскольку для качественного обучения моделей необходимо большое количество данных, помимо реальных изображений документов также использовался метод создания искусственных изображений. Для этого на электронный документ, на которых отсутствовали печати, программным путём добавлялись печати одного из трёх типов в разных количествах и положениях. Таким образом, удалось создать дополнительное количество реалистичных данных для обучения. Стоит отметить, что все изображения документов были получены из открытых источников, а также из собственных документов авторов с маскированием информации, которая может быть отнесена к персональным данным владельца.

Общий объём набора данных составил порядка 6 000 изображений различного разрешения, с максимальным количеством печатей на документе, равным 5. В качестве тестовой выборки было выбрано 124 изображения реальных документов, на каждом из которых есть как минимум одна печать любого типа. Остальные же данные использовались в качестве обучающей выборки, и для них были применены методы аугментации – поворот на 90 и 270°, отражение по горизонтальной и вертикальной оси, добавление шума. Таким образом, общая обучающая

выборка после применения методов аугментации составила более 17,5 тыс. изображений. Для изображений тестовой выборки методы аугментации не применялись. На рис. 1 представлен пример документа и сегментов с печатями, расположенных на нём.



Рис. 1. Примеры обучающих данных:
а – изображение документа; б – сегменты печати

Модель детектирования печатей на документах

В качестве модели для детектирования печатей на документах использовалась модель свёрточной нейронной сети YOLOv11 [1]. Особенностью данной модели является использующийся в ней механизм внимания и анализ потенциальных областей объектов. Таким образом, может анализировать каждый отдельный потенциальный объект на изображении как в контексте всего изображения, так и в своём локальном контексте, что позволяет достигать более качественных результатов. Для обучения использовалась архитектура YOLOv11-nano с 2,6 млн обучаемых параметров, за счёт чего может достигать скорости работы в задаче анализа изображений на CPU, равной порядка 56 мс на одно изображение.

Обучение модели производилось на протяжении 50 эпох для изображений разрешения 512×512 пикселей в задаче сегментации изображений. Точность по метрикам mAP50 и mAP50-90 на валидационной выборке из 54 неизвестных изображений составила 0,96 и 0,87 соответственно. При этом наименьший показатель уверенности для корректно распознанного сегмента составил 0,8, что говорит о достаточно высокой стабильности обученной модели.

Модель определения типа найденной печати

В качестве модели определения типа печати была использована свёрточная нейронная сеть ResNet-18 [2], предварительно обученная на наборе данных Imagenet [3]. Особенность данной сети за-

ключается в использовании residual-связей, дополнительно передающих карту признаков параллельно свёрточным слоям. Такой подход уменьшает затухание градиента при обучении, что уменьшает вероятность переобучения модели. Пример реализации residual-связи представлен на рис. 2.

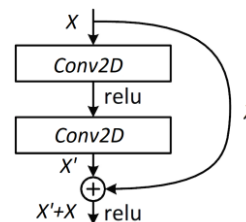


Рис. 2. Пример реализации residual-связи

Обучение ResNet-18 производилось на протяжении 30 эпох с использованием в качестве метода оптимизации весов алгоритма адаптивной градиентной оптимизации Adam с шагом оптимизации $lr = 10^{-5}$. Точность определения типа печати на валидационной выборке для трёх типов печатей составила 0,84 по метрике Accurasy. Основные ошибки при валидации модели определения типов печатей возникают из-за отнесения печатей прямоугольных и треугольных форм к печатям круглой формы. Это вызвано сильной несбалансированностью типов печатей, где суммарное количество печатей прямоугольных и треугольных форм в 3 раза меньше количества печатей круглых форм.

Построение и оценка качества работы интеллектуальной системы

Итоговая интеллектуальная система по определению наличия и типа печатей представляет собой совокупность двух ранее описанных моделей, выполняющих анализ последовательно друг за другом. Общий алгоритм модуля может быть описан следующим образом:

- 1) подмодуль детектирования печати осуществляет поиск печатей в считанном документе;
- 2) если была найдена хотя бы одна печать, выполняется определение типа печати, иначе выводится сообщение об отсутствии печатей в документе;
- 3) для каждой из проанализированных печатей выводится информационное окно, содержащее сам сегмент с печатью, определённой печати, а также уверенности отнесения данной печати ко всем трём типам печатей.

Описанный программный модуль был протестирован на всей тестовой выборке как с использованием только оригинальных изображений, так и изображений, которые были получены с помощью поворота на 90, 180 и 270°. Результаты тестирования приведены в табл. 1.

Таблица 1
Оценка качества работы программного модуля

Тип изображений	Точность детектирования	Точность определения типа
Оригинальные	0,92	0,91
Оригинальные + повороты	0,97	0,93

Помимо оценки качества работы отдельных операций детектирования и определения типа печатей, также было определено общее качество работы программного модуля. Для этого каждый из тестов на отдельном изображении был отнесён к одному из двух типов результатов: положительный – были корректно найдены и определены все печати в документе, отрицательный – программный модуль не смог найти одну или более печатей или не был некорректно определён тип одной или более печатей. Общее качество работы модуля рассчитывалось как отношение положительных результатов к общему числу тестовых запусков (равно числу тестовых изображений), что аналогично подсчёту метрики Accurasy, а следовательно, далее будет также называться точностью модуля (табл. 2).

Таблица 2

Расчёт общей точности модуля

	Оригинальные изображения	Оригинальные изображения + повороты
Точность	0,98	0,96

На основе всех проведённых тестов получено подтверждение, что созданный программный модуль способен с высокой точностью определять наличие на документе печатей трёх разных типов, а также их типы. Отрицательные результаты тестирования зачастую были связаны с наличием на документе более 4 печатей или наличием на документах изображений, схожих с одной из трёх типов печатей.

Заключение

В итоге была разработана собственная интеллектуальная система по автоматическому детектированию и определению печатей на изображениях документов, состоящая из двух модулей: модуль детектирования и модуль определения типа печати. Каждый из подмодулей использует технологии нейронных сетей для решения поставленной задачи.

При тестировании реализованной системы были получены высокие показатели точностей работы как отдельных модулей, так и всей системы. Точности модулей детектирования и определения типа печатей составили 0,92 и 0,91 соответственно, а точность всей системы составила 0,98.

Полученные результаты сопоставимы с аналогичными исследованиями в области детектирования печатей и их классификации с использованием нейронных сетей [4, 5].

Полученные высокие показатели точности дают возможность встраивания разработанной системы в качестве модуля в реальные DLP-системы для уменьшения риска утечки документов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015).

Литература

1. Репозиторий Ultralytics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, свободный (дата обращения: 18.09.2025).
2. He K. et al. Deep Residual Learning for Image Recognition Las Vegas. – NV, USA: IEEE, 2016. – P. 770–778.
3. Deng J. et al. ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database.
4. Bento J. Performance Evaluation of YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10, and YOLOv11 for Stamp Detection in Scanned Documents / J. Bento, T. Paixão, A.B. Alvarez // Applied Sciences. – 2025. – No. 6 (15). – P. 3154.
5. Zaaboub W. et al. Neural Network-based System for Automatic Passport Stamp Classification // Information Technology And Control. – 2020. – No. 4 (49). – P. 583–607.

Старосельцева Диана Викторовна

Студентка фак-та безопасности (ФБ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: Staroseltseva.diana@mail.ru

Солоха Роман Владиславович

Студент ФБ ТУСУРа
Эл. почта: zummer38@mail.ru

Лаптев Павел Юрьевич

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Эл. почта: lpu@fb.tusur.ru

Д.С. Лазорин

Разработка и тестирование метода обнаружения трафика WireGuard в условиях применения средств обфускации

Рассматривается задача обнаружения использования средств анонимизации, в частности, VPN-протокола WireGuard, в корпоративных и государственных сетях. Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка метода обнаружения трафика WireGuard на основе анализа сигнатур, размеров пакетов и структурных особенностей, а также анализ устойчивости данного метода к обфускации трафика с помощью утилиты udr2gaw. Предложен и реализован программный инструмент на языке Python, проведено его тестирование на реальном сетевом трафике. Показано, что базовый метод эффективно детектирует незамаскированный трафик WireGuard, но не устойчив к продвинутой обфускации, маскирующей протокол под TCP. Сформулированы рекомендации по усовершенствованию метода для выявления маскируемого трафика.

Ключевые слова: информационная безопасность, сетевая анонимизация, WireGuard, обнаружение трафика, обфускация трафика.

Современные средства анонимизации сетевого трафика представляют собой серьезный вызов для систем безопасности корпоративных и государственных сетей. Их использование может скрыть несанкционированную передачу данных или доступ к запрещенным ресурсам. Среди множества VPN-протоколов WireGuard выделяется благодаря своей простоте, высокой производительности и использованию современных криптографических алгоритмов, что обуславливает его растущую популярность.

Задача оперативного выявления фактов использования подобных средств является актуальной. Однако эффективное обнаружение WireGuard осложняется тем, что его трафик, будучи зашифрованным, передается по UDP и не имеет явных признаков на уровне приложения. Более того, существуют инструменты, такие как udr2gaw, которые позволяют маскировать UDP-трафик WireGuard под обычный TCP-трафик, что значительно затрудняет его обнаружение традиционными методами Deep Packet Inspection (DPI).

В современном цифровом мире вопросы конфиденциальности и анонимности в сети становятся всё более актуальными. С развитием технологий и увеличением количества киберугроз пользователи всё чаще прибегают к использованию средств анонимизации для защиты своих данных и обеспечения приватности. Анонимизация – это процесс сокрытия или изменения идентифицирующей информации, такой как IP-адреса, местоположение или другие данные, которые могут быть использованы для отслеживания пользователя. Основными средствами анонимизации являются виртуальные частные сети (VPN), прокси-серверы, сети Tor и другие технологии, которые позволяют скрыть реальные данные пользователя и заменить их на фиктивные или зашифрованные.

Однако несмотря на широкое распространение таких технологий, существует и обратный процесс – деанонимизация, который направлен на выявление реальной идентификационной информации пользователя, скрытой за средствами анонимизации. Деанонимизация представляет собой набор методов и

техник, позволяющих восстановить исходные данные пользователя, несмотря на использование им средств защиты [1].

Основные методы деанонимизации включают в себя анализ сетевого трафика, выявление паттернов поведения пользователя, использование уязвимостей в протоколах анонимизации, а также применение методов машинного обучения для классификации и идентификации трафика. Одним из ключевых аспектов деанонимизации является анализ протоколов, используемых для анонимизации. VPN являются одним из самых популярных средств анонимизации, предоставляя пользователям возможность шифровать свой трафик и скрывать реальный IP-адрес. Среди множества протоколов VPN, используемых для обеспечения анонимности, можно выделить OpenVPN, IPSec, L2TP, PPTP и WireGuard. Каждый из этих протоколов имеет свои особенности, преимущества и недостатки, однако в последнее время всё большее внимание уделяется протоколу WireGuard, который считается одним из самых современных и эффективных решений для обеспечения анонимности [2, 3].

WireGuard – это легковесный и высокопроизводительный VPN-протокол, который использует современные криптографические алгоритмы и отличается простотой настройки. Благодаря своей архитектуре WireGuard обеспечивает высокую скорость передачи данных и низкую задержку, что делает его привлекательным выбором для пользователей, ценящих как анонимность, так и производительность. Однако несмотря на свои преимущества, WireGuard также может быть подвержен методам деанонимизации, особенно если злоумышленник имеет доступ к сетевым данным и использует специализированные инструменты для анализа трафика.

В рамках данной работы для исследования методов деанонимизации был выбран протокол WireGuard, а также его форки – WireguardGo и AmneziaWG. WireguardGo представляет собой реализацию WireGuard на языке программирования Go, что делает его более гибким и адаптируемым для различных платформ. AmneziaWG – это модифици-

рованная версия WireGuard, разработанная для повышения уровня анонимности и безопасности, что делает её интересным объектом для исследования в контексте деанонимизации. Выбор именно этих протоколов обусловлен их растущей популярностью и использованием в современных системах анонимизации.

Целью работы является разработка программного механизма для обнаружения признаков использования WireGuard в сетевом трафике и экспериментальная оценка его эффективности в условиях применения средств обфускации.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи.

1. Провести анализ особенностей протокола WireGuard для выявления статических и поведенческих признаков, пригодных для его идентификации.
2. Разработать программу на языке Python, реализующую метод обнаружения на основе анализа сигнатур, размеров пакетов и структуры.
3. Создать лабораторный стенд для генерации эталонного трафика WireGuard.
4. Экспериментально проверить эффективность разработанной программы на чистом и обфусцированном трафике.
5. Сформулировать рекомендации по совершенствованию метода для противодействия обфускации.

Материалы и методы исследования

Основу экспериментальной части работы составил лабораторный стенд, развернутый с использованием программного продукта виртуализации VirtualBox. В его составе были созданы две виртуальные машины с операционной системой Debian 12.1 (ядро 6.1.0-32-amd64), выполнявшие роли VPN-сервера (wgserver с IP-адресом 10.0.2.31/24) и VPN-клиента (wgclient с IP-адресом 10.0.2.33/24). Обе машины использовали сетевой адаптер с типом подключения NAT, что имитировало их нахождение в общей сети с выходом во внешнюю среду. Ключевым инструментом для захвата и первичного анализа сетевого трафика выступил анализатор Wireshark 4.0.10, для корректной работы которого от непривилегированного пользователя были выполнены дополнительные настройки прав доступа.

Процесс исследования включал несколько последовательных этапов. Первоначальным этапом была настройка протокола WireGuard. Для упрощения и стандартизации этого процесса использовался автоматизированный скрипт, который установил все необходимые пакеты и сгенерировал конфигурационные файлы. На сервере был создан виртуальный интерфейс wg0 с IP-адресом 10.66.66.1/24, а также настроены правила iptables, обеспечивающие маршрутизацию трафика между внешним интерфейсом enp0s3 и VPN-интерфейсом и трансляцию адресов (NAT) для выхода клиентов в интернет. На клиенте был размещен конфигурационный файл, содержащий его приватный ключ, внутренний IP-адрес в VPN-сети (10.66.66.2/32) и данные сервера (публичный ключ и внешний адрес). Запуск туннеля на обе-

их машинах командой wg-quick up wg0 инициировал установление защищенного соединения, работоспособность которого подтверждалась выводом команды wg show, отображающей статус подключения и обмен ключами.

Для решения основной задачи работы – обнаружения трафика WireGuard – был разработан специализированный программный модуль на языке Python с использованием библиотеки pyshark. Ядром этого модуля является алгоритм, основанный на многоуровневой проверке поступающих UDP-пакетов. На первом уровне выполняется сигнатурный анализ: проверка первых четырех байт полезной нагрузки пакета на соответствие уникальным идентификаторам сообщений WireGuard, таким как Handshake Initiation (b'\x01\x00\x00\x00'), Handshake Response (b'\x02\x00\x00\x00') или Data Packet (b'\x03\x00\x00\x00').

На втором уровне проводится анализ размеров пакета, при котором его длина сравнивается с эталонными значениями, характерными для различных типов сообщений протокола (например, 92, 128, 148 байт). Третий уровень, структурный анализ, нацелен на выявление в payload специфичных полей, например, последовательностей нулевых байт или структур, соответствующих криптографическим ключам. Для каждого пакета на основе совокупности совпадений вычисляется интегральная оценка вероятности его принадлежности к WireGuard, после чего программа агрегирует результаты, предоставляя общую статистику по файлу.

Для проверки устойчивости разработанного метода к маскировке был применен метод обфускации трафика с помощью утилиты udp2raw. Данная утилита позволяет инкапсулировать UDP-пакеты в поддельные TCP-сегменты, эффективно маскируя исходный протокол. Серверная часть udp2raw была запущена на основном сервере (10.0.2.31), где она прослушивала порт 4000 в режиме faketsr и перенаправляла входящий трафик на локальный WireGuard-сервер, работающий на порту 52012. На клиентской машине udp2raw был запущен в клиентском режиме, создавая локальный прокси на порту 52012 для перенаправления трафика клиента WireGuard на сервер udp2raw. Соответствующим образом был модифицирован конфигурационный файл клиента WireGuard, где в параметре Endpoint был указан адрес локального прокси. Данная конфигурация позволила провести сравнительный анализ эффективности работы детектора до и после применения обфускации.

Анализ результатов проведенного эксперимента

Экспериментальное тестирование разработанного метода обнаружения трафика WireGuard проводилось на двух наборах данных: чистом трафике и трафике, обфусцированном с помощью утилиты udp2raw. При анализе чистого трафика, записанного во время обмена ICMP-запросами через VPN-туннель, программа продемонстрировала стопро-

центную эффективность. Из 116 захваченных пакетов все 116 были корректно идентифицированы как трафик WireGuard. Программа не только верно классифицировала пакеты по типам (Handshake Initiation, Handshake Response и Data Packet), но и точно определила используемые порты (52012 и 60281), что подтвердило работоспособность предложенного подхода, основанного на анализе сигнатур, размеров и структуры пакетов.

Однако последующий тест на обфусцированном трафике выявил ключевое ограничение метода. После настройки udp2raw в режиме faketsp, который инкапсулирует UDP-пакеты WireGuard в поддельные TCP-сегменты, программа не смогла обнаружить ни одного признака целевого протокола. Это закономерный результат, поскольку алгоритм был заточен исключительно под анализ UDP-пакетов и не предусматривал механизмов для декапсуляции и последующего анализа трафика, скрытого внутри иного транспортного протокола.

Полученные результаты четко обозначили границы применимости базового сигнатурного подхода: он эффективен против незамаскированного трафика, но беспомощен против простой инкапсуляции. Для преодоления этого ограничения требуются более совершенные методы, такие как анализ поведенческих паттернов (выявление ритмичных Keeralive-пакетов даже внутри TCP-потока), статистический анализ аномалий в TCP-сессиях (например, короткие сегменты без полезной нагрузки прикладного уровня) и корреляция активности на сетевом интерфейсе с активностью на виртуальном VPN-интерфейсе.

Заключение

В ходе работы был разработан и протестирован метод обнаружения трафика VPN-протокола WireGuard, основанный на анализе сигнатур, размеров пакетов и структурных особенностей. Реализо-

ванная программа доказала свою эффективность при анализе незамаскированного трафика, продемонстрировав 100% точность на контрольном наборе данных. Экспериментально подтверждено, что базовый метод не способен противостоять продвинутой обфускации с использованием udp2raw в режиме faketsp. Это выявило ключевое направление для дальнейших исследований – развитие методов поведенческого и статистического анализа, не зависящих от транспортного протокола.

Полученные результаты имеют практическую ценность для разработчиков систем защиты периметра и SOC-аналитиков, показывая как возможности, так и ограничения сигнатурных методов в условиях применения современных средств маскировки сетевого трафика.

Литература

1. Соколов Д.А. Средства анонимизации, цифровые следы. Программный комплекс «Йолай» // Оперативно-розыскное противодействие наркопреступности: Всерос. науч.-практ. семинар, Красноярск, 09 апреля 2021 г. – Красноярск: Сибирский юридический институт МВД РФ, 2021. – С. 51–55. DOI: 10.51980/2021_4_51.
2. Сергеев С.М. Некоторые проблемы противодействия использованию в преступной деятельности средств обеспечения анонимизации пользователя в сети Интернет // Вестник Санкт-Петербургского ун-та МВД России. – 2017. – № 1(73). – С. 137–140.
3. Масалович А.И. и др. Анонимизация и деанонимизация. «Кибертень» в интернете // Вестник Казахстанско-Британского техн. ун-та. – 2021. – Т. 16, №. 3. – С. 200–211.

Лазорин Данил Сергеевич

Студент РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
Эл. почта: lazorindanya@yandex.ru

С.А. Давыденко, С.А. Литовкин

Методы совмещения результатов классификации на примере продлённой аутентификации

Рассматривается возможность применения совмещения результатов работы сиамских нейронных сетей для повышения качества продлённой аутентификации. В исследовании сравнивается применение отдельных классификаторов по 7 биометрическим факторам, а также 12 методов для совмещения результатов на этапе получения оценки. Помимо этого, выполнено сравнение результатов при подборе граничных значений при итоговой классификации и без него, а также влияние метода подбора весов на итоговые результаты совмещения и дальнейшей классификации. Использование совмещения результатов классификации по используемым биометрическим факторам на этапе оценки позволило добиться повышения качества классификации, при этом сделать систему более устойчивой к спуфингу.

Ключевые слова: сиамские нейронные сети, продлённая аутентификация, классификация, совмещение результатов.

Продлённая аутентификация может использоваться для того, чтобы повысить защищённость компьютерных систем в случае компрометации первичного фактора аутентификации, например пароля [1]. Такой подход предлагает выполнять постоянную проверку личности пользователя во время сеанса через сравнение физических и поведенческих биометрических характеристик пользователя, работающего с системой в определённый момент времени с эталонным образцом данных. Нередки подходы, применяющие при продлённой аутентификации несколько биометрических характеристик, в таком случае имеет смысл совмещение нескольких оценок, поскольку это может повысить общее качество определения верного класса пользователя.

Совмещение данных может выполняться на нескольких этапах: этапе исходных данных (например, усреднение изображений лиц), на этапе получения признаков (можно достигнуть путём конкатенации двух векторов признаков по разным факторам), на этапе оценки (работа выполняется с расстоянием между векторами или вероятностями принадлежности к классам пользователя, полученным от нейронной сети) или на этапе принятия решения (совмещаются итоговые классы пользователей, определённые классификатором). В данной работе рассматривается совмещение на этапе оценки, поскольку данные, используемые в этом методе, обладают общим форматом для любого биометрического фактора, они не требуют дополнительной обработки или предобработки, а также позволяют использовать при совмещении математические методы, а не дополнительные методы машинного обучения. При этом совмещение на уровне оценки позволяет использовать больше доступных методов, поскольку работа происходит не со значениями, равными нулю, а только с близкими к нему.

Используемые методы и данные

Используемый набор данных содержит биометрические данные, полученные во время работы за компьютером 40 пользователей в течение 15–20 мин. Для каждого пользователя сохраняются изображения лица, запись голоса, данные о взаимодействии с

мышью и клавиатурой, записи журналов операционной системы, а также координаты взгляда человека на экране и термограмма. Таким образом, итоговая аутентификация может применять информацию, полученную по 7 биометрическим характеристикам пользователя, а затем выполнять совмещение и аутентификацию.

Для выполнения аутентификации использовались сиамские нейронные сети, определяющие Евклидово расстояние между двумя образцами представленных данных, один из которых может представлять собой данные из прошлого сеанса или данные предыдущих проверок, а второй – данные, полученные за последний цикл съёма биометрических характеристик.

Для комплексирования на этапе оценки использовались методы, подразумевающие в своей основе использование расстояний, полученных от сиамской нейронной сети, а также весовые коэффициенты, рассчитанные для каждого из факторов. К таким методам можно отнести линейную комбинацию [2], мультипликативную модель [3], произведение с весами [4], среднее геометрическое [5], среднее логарифмическое, среднее экспоненциальное комплексирование, усреднение через лепестковую диаграмму, медоид [6], среднее гармоническое [7]. Помимо этого, были рассмотрены минимально-максимальное (min-max) комплексирование, при котором за итоговую оценку принимается минимальное или максимальное значение из перечня полученных, и методы машинного обучения, которые принимают полученный набор расстояний как вектор признаков для бинарной классификации.

Весовые коэффициенты для методов, подразумевающих их использование, получались следующими способами:

- в качестве весов использовалось качество работы классификатора (за параметр качества для каждого фактора принималась доля верных результатов для классификатора на тестовой выборке);
- каждому фактору даётся одинаковый вес;
- веса рассчитываются через метод случайного леса;

– веса получаются через min-max-нормализацию каждого измерения в выборке, а затем расчёт вклада каждого измерения в общую сумму.

Также для каждого рассмотренного метода комплексирования был выполнен подбор граничных значений для отнесения полученного расстояния к классам пользователей с большей точностью чем при применении значения по умолчанию, равного 0,5 (если расстояние меньше 0,5, то образцы считаются принадлежащими одному пользователю, если больше – то разным).

Результаты

Для определения качества работы выполнения продлённой аутентификации пользователя использовались F1-мера и Accurasy, результаты классификации по каждому фактору приведены в табл. 1. Из табл. 2 видно, что использование большинства методов по совмещению данных на этапе оценки позволяет повысить общее качество работы системы по сравнению с применением классификаторов по каждому фактору по отдельности. При этом количество факторов, используемых при аутентификации, значительно увеличивается, что делает систему более устойчивой к спуфингу. Также заметно, что некоторые методы совмещения, наоборот, понижают общее качество работы системы, это может быть связано с тем, что они очень резко реагируют на значения, слишком близкие к единице или слишком близкие к нулю, особенно это заметно у методов, использующих при совмещении оценок произведение, а не сложение результатов.

Таблица 1

Качество работы классификаторов для биометрических факторов по отдельности

Биометрический фактор	Accurasy
Термограмма	0,8595
Аудиозапись	0,8313
Изображение лица	0,9683
Движение глаз	0,796
Клавиатурный почерк	0,7048
Журналы ОС	0,9097
Движения мыши	0,854

Также по результатам из табл. 2 видно, что подбор граничных значений на этапе принятия оценки помог повысить качество работы для каждого рассмотренного метода, в том числе для тех методов, первоначальное качество которых резко упало после объединения оценок. Это связано с тем, что предварительный подбор граничных значений, которые используются для принятия итоговой оценки, будет учитывать характерные особенности каждого метода, например, то, что мультипликативная модель в среднем будет обладать итоговым расстоянием, более близким к нулю, чем другие методы, поскольку в ней нередки умножения на значения, близкие к нулю.

Из табл. 3 видно, что выбор способа определения весов не повлиял на качество решения задачи продлённой аутентификации, что говорит о том, что для качественной продлённой аутентификации достаточно выполнять комплексирование нескольких биометрических факторов, в то время как подбор весов для характеристик является уже не обязательной задачей.

Таблица 2

Влияние подбора граничных значений при комплексировании результатов на этапе оценки

Название метода	Точность без подбора граничных значений		Точность при подборе граничных значений	
	F1-мера	Accurasy	F1-мера	Accurasy
Линейная комбинация	0,9733	0,9726	0,9967	0,9967
Мультипликативная модель	0,6233	0,3957	0,9867	0,9865
Среднее геометрическое	0,9833	0,9831	0,9867	0,9865
Среднее гармоническое	0,9333	0,9286	0,9567	0,9547
Взвешенное среднее геометрическое	0,9633	0,9619	0,9967	0,9967
Минимально-максимальное комплексирование факторов	0,92	0,9137	0,9467	0,9456
Среднее логарифмическое комплексирование	0,5367	0,6834	0,9867	0,9865
Среднее экспоненциальное комплексирование	0,9633	0,9619	0,9967	0,9967
Произведение с весами	0,66	0,4848	0,9867	0,9865
Методы машинного обучения	1	0,997	1	1
Усреднение через лепестковую диаграмму	0,6533	0,4694	0,9967	0,9967
Медоид	0,99	0,99	0,9933	0,9933

Таблица 3

Результаты аутентификации при использовании различных типов весов

Название метода	Равные веса		Точность метода аутентификации		Random Forest		Нормирование по значениям	
	F1-мера	Accurasy	F1-мера	Accurasy	F1-мера	Accurasy	F1-мера	Accurasy
Линейная комбинация	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	1	1	0,6429	0,9667
Среднее геометрическое	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	1	1	0,6897	0,97
Среднее гармоническое	0,9547	0,9567	0,9547	0,9567	0,9547	0,9567	0,4444	0,9333
Среднее экспоненциальное комплексирование	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	0,4324	0,93
Произведение с весами	0,9865	0,9867	0,9865	0,9867	0,9866	0,9867	0,5333	0,9533

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015).

Литература

1. Davydenko S. Continuous Authentication with Eye Movement Biometrics / S. Davydenko, E. Kostyuchenko // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 369–377.
2. Vogt C.C. Fusion via a linear combination of scores / C.C. Vogt, G.W. Cottrell // Information retrieval. – 1999. – Vol. 1, No. 3. – P. 151–173.
3. Goodman L.A. Multiplicative models for the analysis of occupational mobility tables and other kinds of cross-classification tables // American Journal of Sociology. – 1979. – Vol. 84, No. 4. – P. 804–819.
4. Moreo A. Learning to weight for text classification / A. Moreo, A. Esuli, F. Sebastiani // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2018. – Vol. 32, No. 2. – P. 302–316.

5. Tao D. et al. Geometric mean for subspace selection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – Vol. 31, No. 2. – P. 260–274.

6. Li J. et al. MS2OD: outlier detection using minimum spanning tree and medoid selection // Machine Learning: Science and Technology. – 2024. – Vol. 5, No. 1. – P. 015025.

7. Zheng S. et al. Harmonic mean linear discriminant analysis // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2018. – Vol. 31, No. 8. – P. 1520–1531.

Давыденко Сергей Андреевич

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: dsa@fb.tusur.ru

Литовкин Сергей Александрович

Аспирант каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа
Эл. почта: lsa@fb.tusur.ru

М.С. Фролова, М.А. Проневич, С.Д. Грищенко, Ю.О. Лобода

Разработка универсальной системы сканирования на базе искусственного интеллекта

Системы на основе искусственного интеллекта приобретают огромную популярность с момента стремительно-го развития этой отрасли компьютерных наук. Это приводит к важным изменениям в традиционных способах работы с системами на основе ИИ, включая как усовершенствование старых технологий, так и добавление совершенно новых решений. Современные методы разработки систем ИИ включают в себя такие вещи, как использование шаблонов программирования, баз данных, современных и надежных API-интерфейсов и популярных языков программирования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, Python, PostgreSQL, паттерн, микросервис, фреймворк.

Актуальность использования систем с применением искусственного интеллекта значительно выросла за последние несколько лет в связи с большим скачком прогресса в этой отрасли. В связи с этим на рынке начали появляться прототипы [1, 2] сканеров на базе ИИ. В данной статье рассматривается процесс разработки универсальной системы сканирования, использующей машинное обучение, и сравнение подхода к разработке с другими сервисами. Проект призван решить проблему автоматизации производственных задач, а его целью является разработка ИИ системы для эффективной сортировки и поиска данных в мультимедийных файлах. В рамках проекта разрабатывается программная платформа для систематизации, хранения и обработки мультимедийных файлов с целью их последующего использования в задачах машинного обучения.

Ключевые особенности решения

1. Для обеспечения отказоустойчивости, масштабируемости и гибкости выбрана была архитектура микросервисов.

2. В качестве основного языка разработки был выбран Python, который поддерживает работу с AI/ML. Серверная часть реализуется с использованием асинхронного фреймворка FastAPI [3], что обеспечивает высокую производительность при обработке запросов. Для взаимодействия с базой данных применяются Alembic и SQLAlchemy.

3. В качестве хранилища данных была выбрана реляционная база данных с открытым исходным кодом PostgreSQL из-за ее надежности, масштабируемости и поддержки JSON. Это позволяет эффективно хранить как структурированную информацию, например, пользователей, путей к файлам, логи обучения, так и гибкие параметры ИИ-моделей.

4. Также в проекте был использован паттерн CQRS (Command Query Responsibility Segregation) [5] с учетом всех преимуществ данного паттерна, одним из них является разделение команды взаимодействия пользователя с сервером и сервера с базой данных в отдельные файлы. Также использование данного паттерна позволяет упростить отладку кода, так как проще понять, в каком из модулей произошла ошибка.

5. Платформа охватывает весь путь от загрузки «сырых» данных до их подготовки и передачи.

Более подробно об используемых инструментах

1. В качестве языка программирования используется язык Python, так как он имеет ряд преимуществ: интерпретируемость, высокоуровневость, простота подключения ИИ и машинного обучения, простота синтаксиса и наличие огромного количества библиотек, подходящих для использования в данном проекте. Данный язык крайне популярен в этой отрасли и используется проектами [1, 2].

2. Основная база данных в реализуемом проекте – PostgreSQL [4]. Это реляционная база данных с открытым исходным кодом, позволяющая хранить большие объемы базы данных. Также, она совместима с Python библиотекой SQLAlchemy, созданной для работы с SQL-подобными БД через основной язык программирования, а не запросы.

3. Фреймворком для взаимодействия пользователя с API был выбран FastAPI. Это набирающий популярность асинхронный фреймворк. Асинхронность позволяет выполнять код, не дожидаясь ответа от вызванной ранее функции.

4. Для создания миграций к базам данных – фиксирования изменений, ожидаемых в базах данных – используется библиотека Alembic.

5. Для валидации данных, т.е. процесса проверки данных различных типов по критериям корректности, используется библиотека Pydantic.

6. В данном проекте применен паттерн CQRS (Command Query Responsibility Segregation). Паттерн позволяет разделять команды взаимодействия пользователя с сервером и сервера с базой данных в отдельные файлы. Такой паттерн позволяет не только скрыть фрагменты кода, которые не нужны пользователю, но и значительно упростить отладку кода при возникновении ошибок по сравнению с проектами [1, 2], где этот паттерн не был применен. Паттерн подразумевает разделение системы на несколько составляющих (рис. 1).

1. UI – графический интерфейс пользователя. Через него пользователь общается с сервером.

2. Command – блок команд, вносящий изменения в базу данных (команды на создание, обновление и удаление данных).

3. Query – блок команд на получение каких-либо данных из базы. Команды из этого блока не

вносят изменения в базу данных, а лишь считывают уже имеющиеся данные.

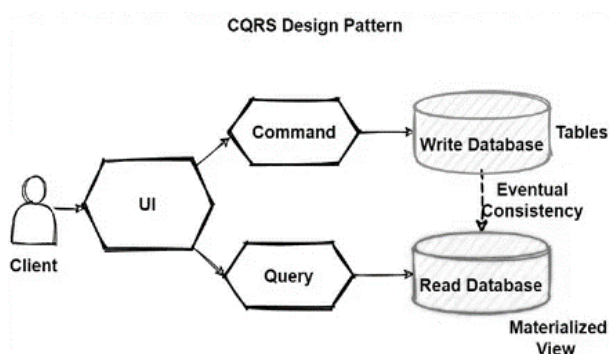


Рис. 1. Схема устройства паттерна

Взаимодействие пользователя с приложением

Реализация взаимодействия с системой в рассматриваемом проекте схожа с таковой в проекте [1]. Взаимодействие пользователя с приложением реализовано следующим образом (рис. 2): необработанные данные с помощью приложения загружаются в базу данных, после чего инженер подключает необходимую для обработки данных нейронную сеть. После этого он производит настройку приложения для корректной работы с данными из базы данных, данные проходят процесс подготовки и сохраняются в модель TrainingData. Обработанные тренировочные данные используют для обучения ИИ.

Анализ проделанной работы

Также была проведена следующая работа:

- Анализ требований к внешнему виду и интерфейсу.

- Определены основные экраны приложения и их функциональные элементы.

- Спроектирован интерфейс с учетом удобства пользователя и адаптивности под мобильные устройства.

- Выбрана цветовая схема и стилистика с использованием библиотеки KivyMD.2.

Разработка экрана авторизации (LoginScreen):

- Реализованы поля ввода для имени пользователя и пароля с валидацией.

- Добавлена кнопка входа с проверкой введенных данных и выводом уведомлений об ошибках.

Разработка главного экрана (MainScreen):

- Созданы кнопки для загрузки фото и видео с фильтрацией по типу файлов.

- Интегрирован файловый менеджер MDFileManager с поддержкой платформ Android и ПК.

- Реализовано отображение выбранного файла в виде текста.

Реализация навигации между экранами:

- Использован ScreenManager для переключения между LoginScreen и MainScreen.

- Обеспечена логика успешного входа и перехода на главный экран

Тестирование и отладка:

1. Приложение было протестировано на персональном компьютере, размер окна установлен на значении 360×640 (рис. 3).

2. Была выполнена проверка корректности работы файлового менеджера и отображения выбранных файлов.

3. Исправлены выявленные ошибки, повышена стабильность работы приложения.

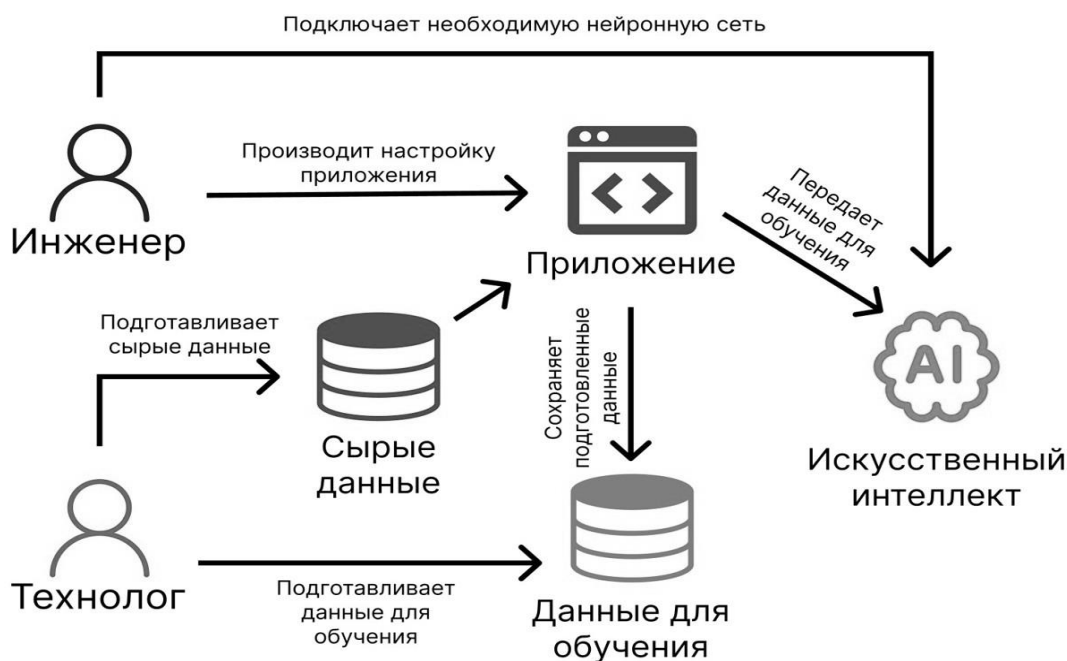


Рис. 2. Схема взаимодействия пользователя с приложением

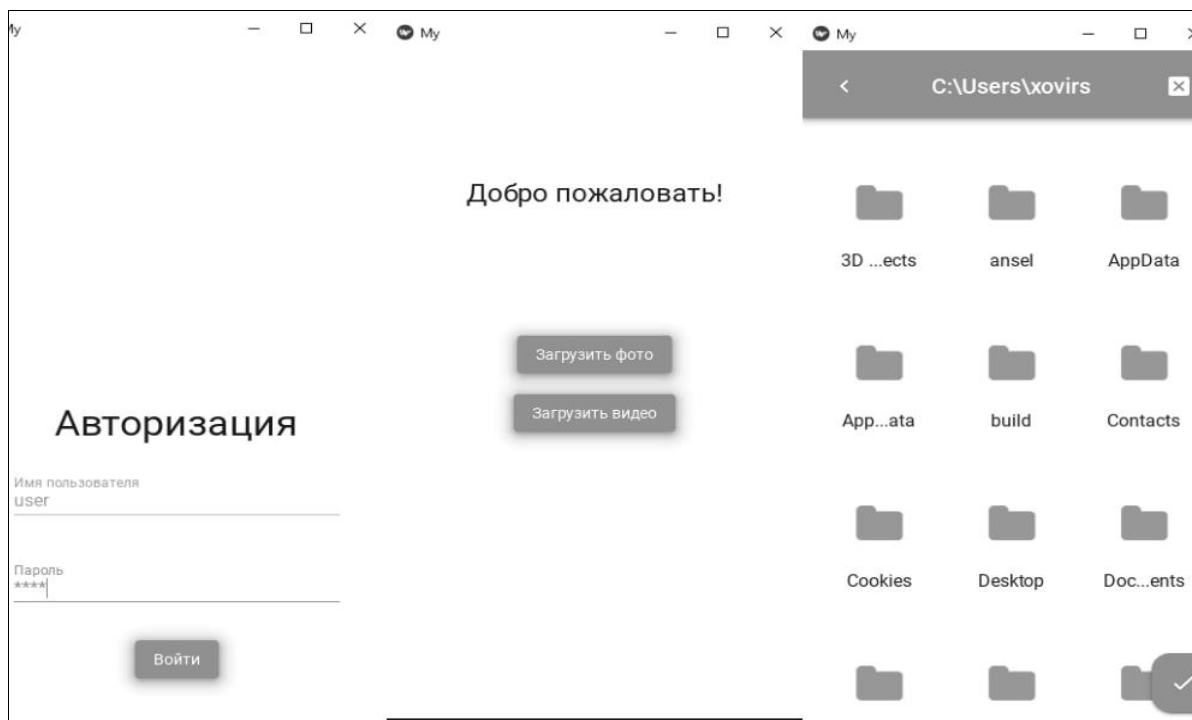


Рис. 3. Графический интерфейс приложения

Вывод

В результате проведенной работы было создано работоспособное приложение с базовым функционалом авторизации и выбора мультимедийных файлов. Интерфейс приложения соответствует требованиям удобства и адаптивности, приложение готово к дальнейшему расширению функционала и интеграции дополнительных функций.

С учетом всех реализованных технологий можно заявить, что проект соответствует современным стандартам разработки систем, использующих машинное обучение и нейронные сети.

Литература

1. Разработка алгоритма функционирования и особенности обучения когнитивного модуля искусственного интеллекта роботизированной системы тепличного растениеводства / А.А. Кирьянов, С.Б. Беневоленский, В.Ю. Сироткин. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-funktsionirovaniya-i-osobennosti-obucheniya-kognitivnogo-modulya-iskusstvennogo-intellekta-robotizirovannoy/viewer> (дата обращения: 19.09.2025).
2. Разработка системы искусственного интеллекта для идентификации отходов / К.В. Епифанцев, С. Ивашенко. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-iskusstvennogo-intellekta-dlya-identifikatsii-othodov/viewer>

3. FastAPI. FastAPI. – URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата обращения: 19.09.2025).

4. PostgreSQL: Documentation: 17: 1. What Is PostgreSQL? PostgreSQL. – URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/intro-what-is.html> (дата обращения: 19.09.2025).

5. CQRS | NestJS – A progressive Node.js framework. NestJS. – URL: <https://docs.nestjs.com/recipes/cqrs> (дата обращения: 19.09.2025).

Фролова Марина Сергеевна

Студентка каф. управления инновациями (УИ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: frolova.m.163@e.tusur.ru

Проневич Максим Александрович

Студент каф. УИ ТУСУРа
Эл. почта: pron585@gmail.com

Грищенко Сергей Дмитриевич

Студент каф. УИ ТУСУРа
Эл. почта: grisenchen@gmail.com

Лобода Юлия Олеговна

Канд. пед. наук, доцент каф. УИ ТУСУРа
Эл. почта: lyo@2i.tusur.ru

А.Д. Брагин, И.С. Мамонтов

Модернизация алгоритмов нейросетевой генерации изображений для повышения качества и снижения потребления видеопамати

Рассматривается сравнение алгоритмической сложности предложенного метода с существующими аналогами, а также проводится анализ его эффективности в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Проведено тестирование производительности и качества, подтверждающее преимущество авторского подхода по отношению скорости к качеству генерации.

Ключевые слова: алгоритмическая сложность, диффузионные модели, генерация изображений, веб-приложения, машинное обучение.

Актуальность и целеполагание

Современный этап развития генеративных моделей в области искусственного интеллекта ознаменовался значительным прорывом благодаря внедрению диффузионных моделей. Эти модели представляют собой класс вероятностных генеративных алгоритмов, которые превращают случайный шум в репрезентативное изображение методом последовательного устранения шума. Такой подход, впервые представленный на практике с 2015 г., получил развитие к 2020–2022 гг., когда были представлены широко известные решения, такие как DALL-E2 от OpenAI, Imagen от Google и Stable Diffusion [1], которые способны генерировать изображения высокого качества и разрешения.

Современные диффузионные модели генерации изображений достигли впечатляющих результатов по качеству создаваемого контента, однако обладают высокой алгоритмической сложностью и значительными требованиями к вычислительным ресурсам. Процесс генерации требует большого числа итераций, что увеличивает время отклика и ограничивает применение моделей в условиях ограниченной мощности устройств и при необходимости масштабируемой работы в веб-приложениях.

Кроме того, существующие алгоритмы сталкиваются с проблемой баланса между скоростью генерации и качеством изображения, что осложняет их эффективное внедрение в практических задачах, где требуется оперативное создание визуального контента без существенных потерь в детализации и точности. Оптимизация использования ресурсов и снижение алгоритмической сложности остаются ключевыми вызовами для расширения применения таких технологий.

В этих условиях актуальной задачей является разработка методов, позволяющих сократить количество итераций генерации и оптимизировать архитектуру алгоритма, сохраняя высокое качество продукции и обеспечивая сопоставимую или превосходящую результативность по сравнению с конкурентными подходами.

Целью данного исследования является создание масштабируемого алгоритма генерации с меньшим потреблением видеопамати и меньшим временем генерации на основе диффузионных моделей, опти-

мизированного для локальной обработки и асинхронного взаимодействия в веб-приложении. Важной частью работы является сравнительный анализ алгоритмической сложности данного алгоритма с существующими методами, а также эмпирическая оценка его результативности, выражающейся через скорость генерации, качество создаваемых изображений и эффективное использование аппаратных ресурсов.

Обсуждены технические аспекты алгоритма и архитектуры системы, обоснование выбора методов, а также результаты, иллюстрирующие эффективность подхода в практических задачах, включая творческие и образовательные сценарии.

Целевые ограничения системы

1. Безопасность обработки данных обеспечивается реализацией процесса генерации изображений на локальных вычислительных ресурсах.

2. Интеграция модуля генерации в веб-приложения с поддержкой асинхронного взаимодействия и масштабируемости.

3. Обеспечение кроссплатформенной совместимости с операционными системами Windows 10/11 и Ubuntu. Учет разнообразия устройств ввода – сенсорные мониторы, компьютерная мышь и графические планшеты.

Функции объекта моделирования

Система генерации уникальных изображений на основе пользовательских эскизов с использованием современных диффузионных моделей включает следующие основные функции:

1. Анализ и сравнение входных данных (например, пользовательских эскизов или параметров алгоритма) в контексте требований к вычислительным ресурсам и качеству изображения.

2. Определение оптимального числа итераций и этапов диффузионного процесса с целью снижения временных затрат без существенного снижения качества.

3. Применение усовершенствованных алгоритмических подходов для балансировки между скоростью генерации и визуальной детализацией результата.

4. Оценка и управление использованием аппаратных ресурсов, обеспечивающее эффективное распределение нагрузки и уменьшение потребления памяти.

5. Постобработка и улучшение качества изображений с минимальными затратами вычислительной мощности.

6. Сбор и анализ метрик результативности, таких как время отклика, качество изображения (субъ-

ективные и объективные оценки) и алгоритмическая сложность, для сравнительного исследования с конкурентными решениями.

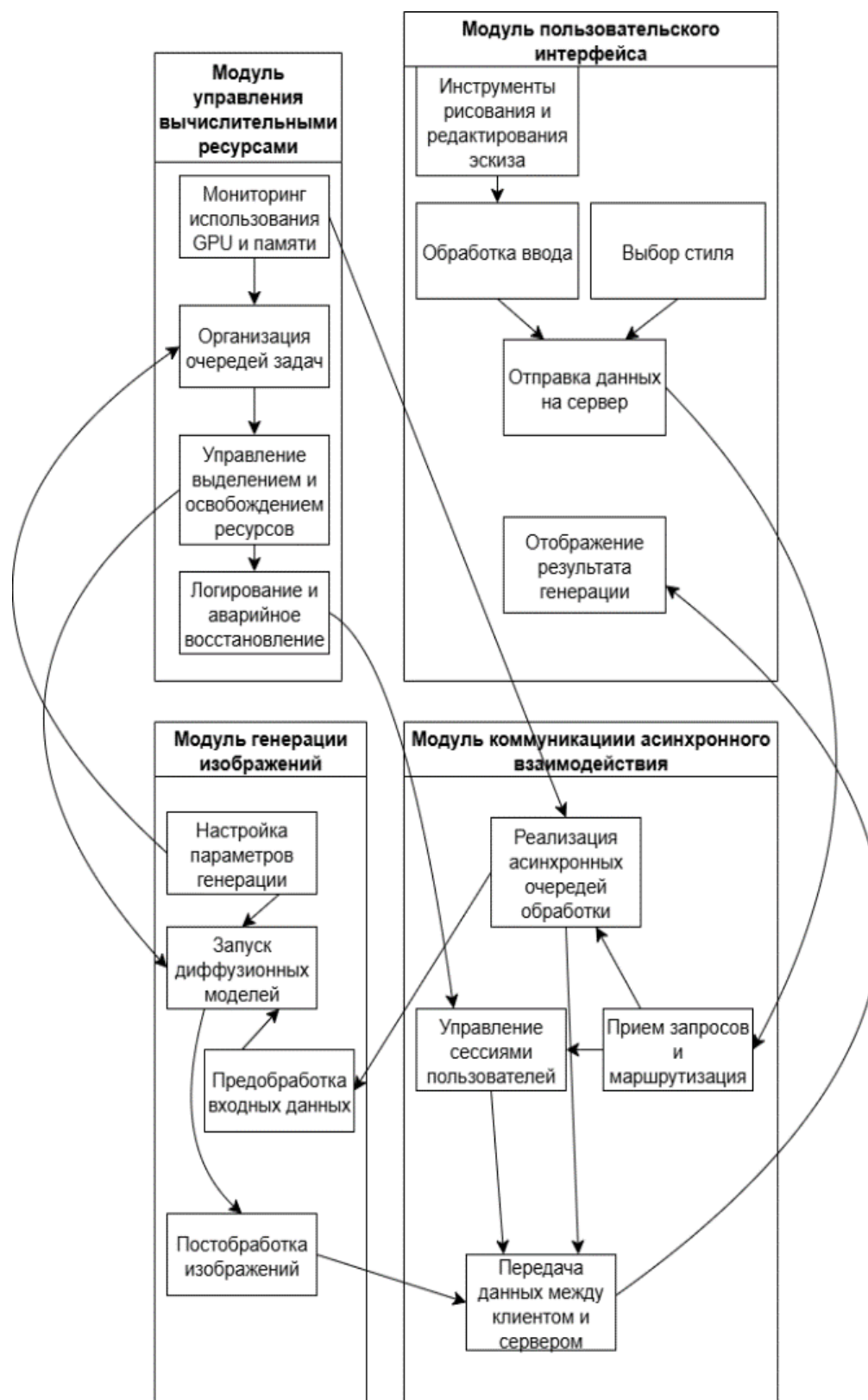


Рис. 1. Общая архитектура системы

Технологический стек

Система построена на основе современных веб-технологий и включает несколько ключевых компонентов. Для рисования эскизов используется HTML5 Canvas, который позволяет создавать динамическую растровую графику и анимацию непосредственно в браузере.

Для взаимодействия с пользователем применяются Vue и JavaScript, что обеспечивает отзывчивый и удобный интерфейс с возможностью работы с canvas в рамках Vue-компонентов. Серверная часть реализована на Flask framework с поддержкой асинхронных операций для эффективной обработки запросов.

Для работы с диффузионными генеративными моделями используется Python с библиотеками PyTorch и Diffusers, обеспечивая мощные возможности машинного обучения и генерации изображений. В системе также реализована поддержка хранения пользовательских сессий и истории генераций, что позволяет сохранять состояние работы и повторно использовать результаты генерации.

Процесс генерации изображений

Система реализует многоэтапный процесс генерации изображений. На первом этапе пользователь создает эскиз в веб-интерфейсе с использованием различных инструментов рисования, что позволяет точно задать исходный визуальный контент.

Далее происходит нормализация размеров изображения, применение фильтров шума и конвертация в требуемый формат для подготовки к обработке.

На следующем шаге используется предобученная диффузионная модель, которая генерирует изображение на основе подготовленных данных. После этого выполняется улучшение качества результата и применение стилизованных фильтров для достижения желаемого визуального эффекта.

Заключительный этап – отображение сгенерированного изображения пользователю через веб-интерфейс, обеспечивая удобный и наглядный доступ к итоговому результату. Такой подход обеспечивает гибкость, высокое качество и контроль на всех этапах генерации.

Оптимизация производительности

Для обеспечения эффективной работы в условиях ограниченных ресурсов были реализованы следующие оптимизации: автоматическое освобождение памяти GPU между генерациями позволяет минимизировать использование видеопамати, что особенно важно при работе с ограниченными объемами памяти; асинхронная обработка запросов с приоритизацией способствует более эффективному управлению вычислительными задачами, позволяя выполнять важные задачи быстрее и снижать время ожидания; адаптивное изменение разрешения в зависимости от доступных ресурсов помогает балансировать между качеством и производительностью, снижая нагрузку на GPU при нехватке ресурсов; сохранение промежуточных результатов ускоряет

повторные генерации, экономя время и ресурсы, так как не требует полного повторного вычисления.

Эти методы оптимизации памяти и вычислительных операций на GPU основаны на современных подходах к балансу нагрузки, управлению памятью и параллельным вычислениям, что позволяет значительно повысить общую производительность и масштабируемость системы.

Производительность системы

Тестирование системы показало характеристики производительности, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тесты производительности

Метрика	Значение	Условия тестирования
Время генерации	4–6 с	NVIDIA RTX 4070, 12GB VRAM
Максимальное разрешение	1024×1024 пикселей	Оптимальный режим
Пропускная способность	500 генераций/ч	Последовательная обработка
Потребление GPU памяти	11–12 ГБ	Обученная полная модель
Качество соответствия	85–90%	Субъективная оценка пользователей

Анализ функциональности

Разработанное веб-приложение используется в образовательных и прикладных задачах. Оно применяется для обучения концепциям компьютерной графики и машинного обучения, создания визуальных прототипов и иллюстраций, поддержки творческих проектов, а также для исследования возможностей генеративных моделей. Такое сочетание областей делает систему полезным инструментом в обучении и профессиональной деятельности.

Интеграционные возможности

Система спроектирована с учетом возможности интеграции в более крупные платформы, обеспечивая гибкость и расширяемость. Основные направления интеграции включают RESTful-интерфейс, который предоставляет программный доступ к функциям генерации, что позволяет легко встраивать систему в различные приложения и сервисы. Также предусмотрены модули для популярных систем управления контентом, что упрощает внедрение системы в существующую инфраструктуру веб-сайтов и платформ. Дополнительно реализована возможность развертывания системы в облачной инфраструктуре, что обеспечивает масштабируемость, гибкость ресурсов и удобство эксплуатации в различных бизнес-сценариях. Такая архитектура облегчает интеграцию и автоматизацию процессов генерации изображений в рамках более обширных платформ и бизнес-экосистем.

Текущие ограничения

Система имеет ограничения, которые определяют направления для дальнейшего развития:

1. Время генерации зависит от доступных вычислительных ресурсов.

2. Максимальное разрешение ограничено объемом видеопамати.

Перспективы развития

Планируемые улучшения системы включают внедрение более эффективных архитектур, что позволит значительно ускорить процесс генерации изображений, повышая общую производительность.

Также планируется добавить новые художественные стили и техники, расширяя возможности творчества и индивидуализации результата. Особое внимание уделяется развитию инструментов для более точного контроля процесса генерации, что даст пользователям возможность более детально управлять параметрами и качеством создаваемых изображений.

Дополнительно планируется адаптация системы для работы на мобильных устройствах, обеспечивая удобный доступ к функционалу и генерации изображений в любых условиях и на различных платформах.

Сравнение с аналогами

Предложенный алгоритм генерации изображений на основе оптимизированной диффузионной модели демонстрирует конкурентные преимущества по двум ключевым параметрам: алгоритмической сложности и результативности по качеству создаваемого изображения.

В отличие от таких популярных алгоритмов, как DALL-E 3 и Midjourney, которые обеспечивают высокую детализацию и широкий набор стилей, но требуют большого числа итераций и значительных ресурсов GPU, наш алгоритм сокращает количество итераций без существенной потери качества. Это достигается за счет адаптивного управления процессом диффузии и оптимизации архитектуры модели, что значительно снижает время генерации и потребление памяти.

DALL-E 3 отличается точным пониманием сложных текстовых запросов и возможностью многоступенчатой доработки изображения, однако для большинства пользователей он доступен преимущественно через облачные сервисы с подпиской, что ограничивает автономное использование.

Наш алгоритм ориентирован на более широкое применение в локальных и веб-приложениях за счет меньших требований к аппаратуре [2].

Midjourney предлагает высокую креативность и стилистическую вариативность, но его время отклика и алгоритмическая сложность также остаются высокими. Предлагаемое решение конкурирует с Midjourney по времени генерации, обеспечивая при этом более предсказуемый контроль качества за счет встроенных инструментов анализа промежуточных результатов [3].

Таким образом, предложенный алгоритм комбинирует преимущества по скорости работы, алгоритмической оптимизации и качеству результата, что выгодно отличает его среди ведущих аналогов на рынке 2025 г.

В табл. 2 представлен сравнительный анализ алгоритмов.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов

Параметры	Авторский алгоритм	DALL-E 3	Midjourney
Основная технология	Text-to-img + оптимизированная диффузия	Текст-к-изображению + диффузия	Диффузионная модель
Алгоритмическая сложность	Снижена за счет адаптивных итераций	Высокая	Высокая
Время генерации	4–6 с	8–10 с	6–8 с
Потребление ресурсов	Оптимизировано, сниженное	Высокое, требует облака	Высокое
Локальное использование	Полная поддержка	В основном облако	В основном облако
Модель лицензирования и доступ	Гибридный	Преимущественно платный	Подписка
Особенности	Баланс скорости и качества, анализ промежуточных результатов	Интеграция с ChatGPT, поддержка сложных запросов	Отличная стилистика и вариативность

Заключение

В результате проведенного исследования было разработано и реализовано веб-приложение для генерации изображений на основе пользовательских эскизов с использованием современных диффузионных моделей. Система обеспечивает локальную обработку данных, кроссплатформенную совместимость и приемлемую производительность для творческих задач.

Основные достижения включают создание масштабируемой архитектуры интеграции генеративных технологий в веб-среду, обеспечение стабильной работы системы в условиях ограниченных локальных ресурсов, разработку адаптивного интерфейса для создания эскизов и управления процессом генерации, а также подтверждение эффективности системы для решения творческих и образовательных задач.

Пользовательское тестирование показало высокую оценку удобства использования и качества генерации изображений. Система демонстрирует потенциал для широкого применения в дизайне, образовании и творчестве.

Перспективы развития включают оптимизацию производительности, расширение функциональности и адаптацию под мобильные устройства.

Разработанное решение может стать основой для создания специализированных приложений в области генеративного искусства и компьютерного дизайна.

Диффузионные модели, используемые в системе, являются одним из самых передовых методов генерации изображений, позволяющих преобразовывать шум в высококачественные визуальные результаты с помощью сложных вероятностных алгоритмов и обучения на больших наборах данных.

Литература

1. Статья на Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/713076>, свободный (дата обращения: 25.09.2025).
2. OpenAI. DALL·E 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openai.com/index/dall-e-3>, свободный (дата обращения: 25.09.2025).
3. Как пользоваться нейросетью Midjourney в 2025 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hi-tech.mail.ru/review/61167-how-to-midjourney>, свободный (дата обращения: 25.09.2025).

Брагин Александр Дмитриевич

Ст. преп. отд. информационных технологий
ИШИТР НИ ТПУ
Эл. почта: bragin@tpu.ru

Мамонтов Игорь Сергеевич

Бакалавр направления программной инженерии,
отд. информационных технологий ИШИТР НИ ТПУ
Эл. почта: ism159@yandex.ru

Т.Д. Леоненко, А.К. Кемеров, А.В. Матафонов

Модели жизненных циклов процессов разработки и эксплуатации программного обеспечения и угрозы безопасности

Исследованы построение и анализ моделей жизненного цикла программного обеспечения: разработки и эксплуатации. Цель – определить угрозы безопасности информации на каждом этапе. Результатом стали диаграммы жизненного цикла и список угроз конфиденциальности и целостности для каждого этапа.

Ключевые слова: модель жизненного цикла, разработка программного обеспечения, эксплуатация программного обеспечения, информационная безопасность, угрозы безопасности информации.

Данная работа посвящена жизненному циклу программного обеспечения (ПО). Жизненный цикл ПО был разделён на два процесса: процесс разработки и процесс эксплуатации для детального рассмотрения этих процессов с учётом возможного возникновения ошибок в ходе разработки и эксплуатации ПО.

Жизненный цикл процесса разработки программного обеспечения

Процесс разработки ПО состоит из взаимосвязанных этапов, направленных на создание продукта. В [1] описан 21 этап процесса разработки ПО, из которых для типовой модели выделено 5 основных. Кроме того, выделены 4 дополнительных этапа. Диаграмма этапов процесса разработки ПО представлена на рис. 1.

Ранее в [2] были представлены схемы моделей жизненных циклов процессов микросхем. На тех схемах вход и выход в жизненный цикл осуществлялись через один блок. В данной ситуации теряется 1 блок с результатом этапа. Текущая схема составлялась, основываясь на подходе, отражённом в [2], но вход и выход реализуются через 2 разных блока.

Ниже описан каждый этап, представленный на рис. 1.

1. Планирование процесса разработки.

На этом этапе определяются цели и задачи, формируется план работ с учетом ресурсов и приоритетов, выбираются методологии и инструменты. Результатом становятся регламенты и документы, обеспечивающие порядок работы.

2. Формирование и предъявление требований к ПО.

Собираются требования от заказчика, анализируются и формализуются в техническом задании и регламентах для последующей разработки.

3. Разработка ПО.

Происходит создание программных модулей согласно требованиям, внедрение управления версиями и конфигурациями, а также регулярный анализ кода для выявления уязвимостей.

4. Тестирование разработанного ПО.

Проводится функциональное, нагрузочное и тестирование на безопасность, а также экспертиза кода. Все результаты документируются.

5. Выпуск готового продукта.

На этом этапе собирается и упаковывается готовый продукт с версиями и метаданными. Подго-

тавливаются релизная документация и инструкции, а также реализуется контроль за доставкой и развертыванием.

6. Проверка на актуальность правил кодирования.

Проводится анализ соблюдения стандартов кодирования, внутренних регламентов и статистический анализ для выявления возможных ошибок.

7. Исправление кода ПО.

После выявления ошибок, связанных с кодированием, вносятся изменения, упрощается логика, выполняется переименование элементов. Затем проводится тестирование, чтобы исключить новые ошибки.

8. Проверка на наличие вредоносного ПО.

На этапе проверки анализируется ПО статистическим, динамическим и композиционным методами для выявления вредоносных компонентов.

9. Удаление вредоносного ПО.

Обнаруженные вредоносные компоненты анализируются по происхождению и целям, затем удаляются, проводится очистка системы и принимаются меры предотвращения повторных инцидентов.

Жизненный цикл процесса эксплуатации программного обеспечения

Процесс эксплуатации программного обеспечения включает действия для обеспечения его бесперебойной, эффективной и безопасной работы после выпуска и внедрения. Описание жизненного цикла эксплуатации и связанных угроз безопасности построено на основании модели жизненного цикла разработки ПО.

Жизненный цикл процесса эксплуатации представлен на рис. 2.

Ниже подробно описан каждый этап, который был показан на рис. 2.

1. Получение дистрибутивов компаний.

Первым этапом эксплуатации является получение установочных пакетов от поставщика или разработчика. Проводится проверка целостности и антивирусный скан дистрибутива.

2. Установка программы.

Дистрибутивы устанавливаются на целевые компьютеры согласно инструкциям. Программа регистрируется в системе, настраиваются реестр, сетевые порты и базы данных, задаются необходимые параметры.

3. Эксплуатация программы.

Программа используется по назначению, проводится мониторинг работоспособности, производительности и ошибок. Возможна интеграция с другими приложениями.

4. Остановка действия программы.

Программа безопасно прекращает работу без потерь данных и готовится к удалению.

5. Удаление программы.

Удаляются все файлы, библиотеки, временные данные, проводится очистка реестра, учетных записей и освобождение ресурсов.

6. Контроль корректности работы.

Во время эксплуатации осуществляется мониторинг доступности ПО, анализ ошибок, проверка состояния сервисов и безопасности. Изучаются журналы событий и проводится тестирование ключевых функций, после чего формируются отчёты.

7. Восстановление корректности работы.

При выявлении ошибок выполняются перезапуск, восстановление из резервной копии, установ-

ка исправлений, изменение конфигураций или откат изменений. После восстановления проводится тестирование для подтверждения исправности.

8. Проверка наличия обновлений.

Выполняется мониторинг ресурсов разработчика на новые версии и патчи, а также оценивается необходимость их установки.

9. Установка обновлений.

Перед установкой создаются резервные копии данных, затем выполняется обновление ПО с последующей документацией процесса.

Угрозы на этапах процессов разработки и эксплуатации программного обеспечения

После определения этапов разработки и эксплуатации ПО были сформированы угрозы безопасности на каждом из них. Угрозы разделены на две категории: конфиденциальности и целостности.

В табл. 1 представлены угрозы на этапах разработки ПО. В табл. 2 представлены угрозы на этапах эксплуатации ПО.

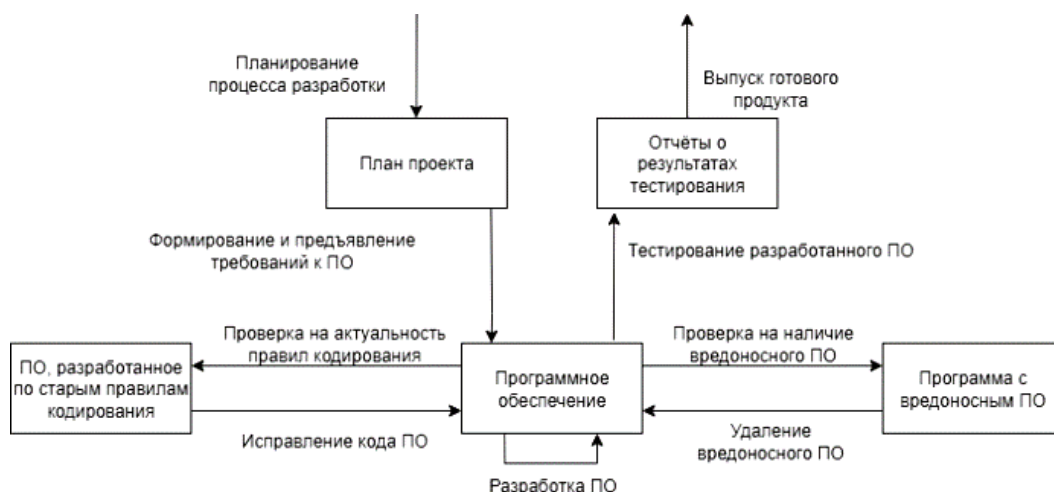


Рис. 1. Этапы разработки программного обеспечения



Рис. 2. Этапы эксплуатации программного обеспечения

Таблица 1

Угрозы на этапах процесса разработки программного обеспечения

Этап	Конфиденциальность	Целостность
Планирование процесса разработки	Утечка конфиденциальной информации о целях и задачах проекта	Модификация или искажение плановых документов
Формирование и предъявление требований к ПО	Несанкционированное раскрытие критичных требований заказчика	Внесение неверных или искажённых требований, нарушающих целостность спецификации
Разработка ПО	Внедрение вредоносного кода, нарушающего целостность продукта	Раскрытие конфиденциальных данных через исходный код
Тестирование разработанного ПО	Несанкционированный доступ к тестовым данным с персональной или коммерческой информацией	Фальсификация результатов тестирования и отчетов
Выпуск готового продукта	Неавторизованный доступ к релизным сборкам	Модификация или подмена релизных пакетов
Проверка актуальности правил кодирования	Недопустимое изменение или удаление стандартов правилами кодирования	Утечка методических материалов и внутренних регламентов по кодированию
Исправление кода ПО	Случайное раскрытие конфиденциальной информации данных в исправляемом коде	Подмена или модификация исправляемого кода сторонними вредоносными компонентами
Проверка на наличие вредоносного ПО	Проникновение вредоносных компонентов в исходный код	Скрытое внедрение вредоносного кода в процессе проверки
Удаление вредоносного ПО	Внедрение вредоносного кода, нацеленного на сбор данных, под видом инструментов для удаления	Повреждение или удаление легитимных данных при попытке удаления вредоносного ПО

Таблица 2

Угрозы на этапах процесса эксплуатации программного обеспечения

Этап	Конфиденциальность	Целостность
Получение ПО	Установка модифицированной версии программы с измененной функциональностью	Получение дистрибутива, содержащего вредоносный код для сбора информации
Установка ПО	Нарушение целостности системных файлов и библиотек при установке	Настройки по умолчанию, допускающие неконтролируемую передачу данных
Эксплуатация программы	Некорректное функционирование программы вследствие изменений конфигурации программы	Неавторизованный доступ к конфиденциальным данным
Проверка обновлений	Получение ложной информации о доступных обновлениях	Передача конфиденциальных данных о системе при проверке обновлений
Установка обновлений	Нарушение работоспособности программы после установки обновлений	Установка обновлений, содержащих компоненты для сбора информации
Контроль корректности работы	Сохранение программы в неработоспособном состоянии	Разглашение информации о внутренних ошибках программы
Остановка действия программы	Нарушение целостности пользовательских данных при аварийном завершении	Сохранение конфиденциальных данных в памяти после остановки
Удаление программы	Нарушение работы других приложений после удаления общих компонентов	Сохранение конфиденциальных данных после удаления программы

Заключение

По итогу работы были составлены 2 модели жизненного цикла программного обеспечения и составлены списки угроз на этапах разработки и эксплуатации ПО.

Литература

- ГОСТ Р 56939–2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. – М.: Стандартинформ, 2024.
- Модель жизненного цикла системы защиты информации / А.А. Конев, Т.Е. Минеева, М.Л. Соловьёв, А.А. Шелупанов, М.П. Силич // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 34–41.

Леоненко Татьяна Дмитриевна

Студентка Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: leonenko-0404@mail.ru

Кемеров Александр Константинович

Студент ТУСУРа
Эл. почта: kemeralex@mail.ru

Матафонов Артем Вячеславович

Студент ТУСУРа
Эл. почта: mva80801@gmail.com

А.Я. Суханов, Н.Е. Тарабрин, Д.А. Мисиян

Улучшение точности автоматической разметки телерентгенограмм с помощью современных методов глубокого обучения

Представлено исследование методов улучшения точности автоматической разметки анатомических ориентиров на телерентгенограммах (ТРГ). Ранее в исследовании использовалась классическая сверточная нейронная сеть (CNN) с BatchNorm, в данной работе рассматриваются возможности применения архитектуры ResNet, слоев Attention и нормализации GroupNorm. Для подготовки данных разработано настольное приложение, позволяющее специалистам-ортодонтам самостоятельно размечать снимки. Приведены промежуточные результаты, показывающие влияние модификаций архитектуры на точность предсказания.

Ключевые слова: ResNet, Attention Layer, GroupNorm, CNN, медицинские изображения, телерентгенография.

Анализ телерентгенограмм (ТРГ) является важным инструментом диагностики в ортодонтии. С его помощью врач может определить пространственные соотношения зубов, челюстей и лицевого скелета, что позволяет не только выявлять патологические изменения, но и планировать дальнейшее лечение.

Однако ручная разметка требует значительных временных затрат и высокой квалификации врача. Кроме того, присутствует фактор субъективности: разные врачи могут по-разному определить одно и то же анатомическое положение, что снижает воспроизводимость результатов. Ранее нами была разработана модель CNN, обеспечившая точность локализации ориентиров в пределах 1,5–2 мм [1]. Несмотря на хорошие результаты, для повышения точности и устойчивости работы модели будут рассмотрены современные подходы глубокого обучения.

В данной работе акцент сделан на трех направлениях: применении сетей ResNet, использовании механизмов внимания (Attention) и внедрении нормализации GroupNorm. Эти методы доказали эффективность в других областях компьютерного зрения, но их влияние на задачу разметки телерентгенограмм ранее практически не исследовалось.

Современные методы глубокого обучения позволяют автоматизировать этот процесс, повышая точность и сокращая трудозатраты. Нейросетевые модели успешно применяются в медицинской визуализации [2], однако качество их работы напрямую зависит от архитектуры, метода нормализации и объема обучающих данных.

Цель исследования – определить вклад этих компонентов в задачу автоматической разметки ТРГ и определить оптимальную комбинацию методов, обеспечивающую наибольшую точность и стабильность модели.

Обзор методов

ResNet [3] – Residual-соединения позволяют строить глубокие сети, избегая проблемы затухания градиентов. Такой подход улучшает извлечение сложных и маловыраженных признаков, что важно для медицинских изображений.

GroupNorm [4] – в отличие от BatchNorm, нормализация по группам не зависит от размера пакета,

что делает метод удобным при обучении на небольших батчах (характерных для снимков с высоким разрешением).

Attention слои – это слои нейронных сетей, которые обращают внимание на определенные элементы, учитывая контекст. Механизмы внимания позволяют модели выделять наиболее значимые области изображения. В случае с ТРГ это особенно актуально: многие анатомические ориентиры представляют собой небольшие, трудноразличимые элементы, и простая свертка не всегда способна выделить их с достаточной точностью.

Методика исследования

Данные. Изначально набор данных включал 50 телерентгенограмм, размеченных вручную экспертами-ортодонтами. Однако количество снимков оказалось ограничивающим фактором для обучения моделей. Для решения этой проблемы было разработано настольное приложение, позволяющее специалистам-ортодонтам в удобной форме проводить разметку ключевых точек. С его помощью удалось не только расширить обучающую выборку до 150 снимков, но и выстроить процесс разметки как коллективную работу нескольких экспертов. Это позволило снизить субъективность и повысить согласованность данных, что является важным условием для обучения нейросетей. Все это дало возможность значительно повысить качество обучения и уменьшить риск переобучения.

Архитектуры. В исследовании были протестированы четыре варианта архитектуры:

- базовая CNN с BatchNorm из прошлого исследования;
- CNN с заменой BatchNorm на GroupNorm;
- ResNet-блоки вместо стандартных сверточных слоев;
- CNN с добавлением Attention слоев на высокоуровневых признаках.

1. Обучение.

Оптимизатор AdamW, функция потерь – Huber Loss. Обучение проводилось в течение 100 эпох, lr снижался по StepLR каждые 5 эпох.

Оценка качества производилась по критерию средней ошибки локализации ключевых точек (в пикселях).

Результаты исследования

Базовая CNN (с BatchNorm). На обучающем наборе модель быстро вышла на плато в диапазоне ошибки 16–18 пикселей (1,5–2 мм).

Модель показала удовлетворительный результат, который дальше будет рассматриваться как контрольный для сравнения с другими моделями.

CNN с GroupNorm. Ошибка держалась в пределах 17–19, значения ошибки изменялись плавно, без резких скачков, что говорит о большей устойчивости по сравнению с BatchNorm. Модель не показывает выдающихся положительных результатов по сравнению с базовой, но обучается заметно стабильнее, чем базовая модель.

CNN с Attention блоками. Данный вариант показал лучшие результаты. Ошибка снизилась до 13–15 пикселей, что соответствует точности 1–1,5 мм. Кроме того, модель обучалась более стабильно, чем базовая CNN: процесс сходимости был плавным, а итоговые результаты воспроизводимыми. Это говорит о том, что механизмы внимания позволяют корректно выделять важные локальные участки изображения.

ResNet. Ошибка стабилизировалась на уровне ~23, что хуже, чем у других моделей. Вероятной причиной является малая обучающая выборка – архитектура ResNet гораздо более требовательна к объему данных. При увеличении размера датасета можно ожидать улучшения качества, но в текущих условиях этот подход оказался неоптимальным.

В текущих условиях ResNet оказался неоптимальным решением, хотя в случае увеличения базы снимков его эффективность может возрасти.

Заключение

Проведённое исследование показало, что для задачи автоматической разметки телерентгенограмм наилучшие результаты демонстрирует CNN с добавлением Attention-блоков. Средняя ошибка 13–15 пикселей соответствует клинически значимой точности 1–1,5 мм, что сравнимо с результатами ручной разметки специалиста. По сравнению с базовой моделью точность увеличилась примерно на 30%, что подтверждает эффективность использования механизмов внимания в архитектуре нейросети. Сравнение результатов обучения представлено на рис. 1.

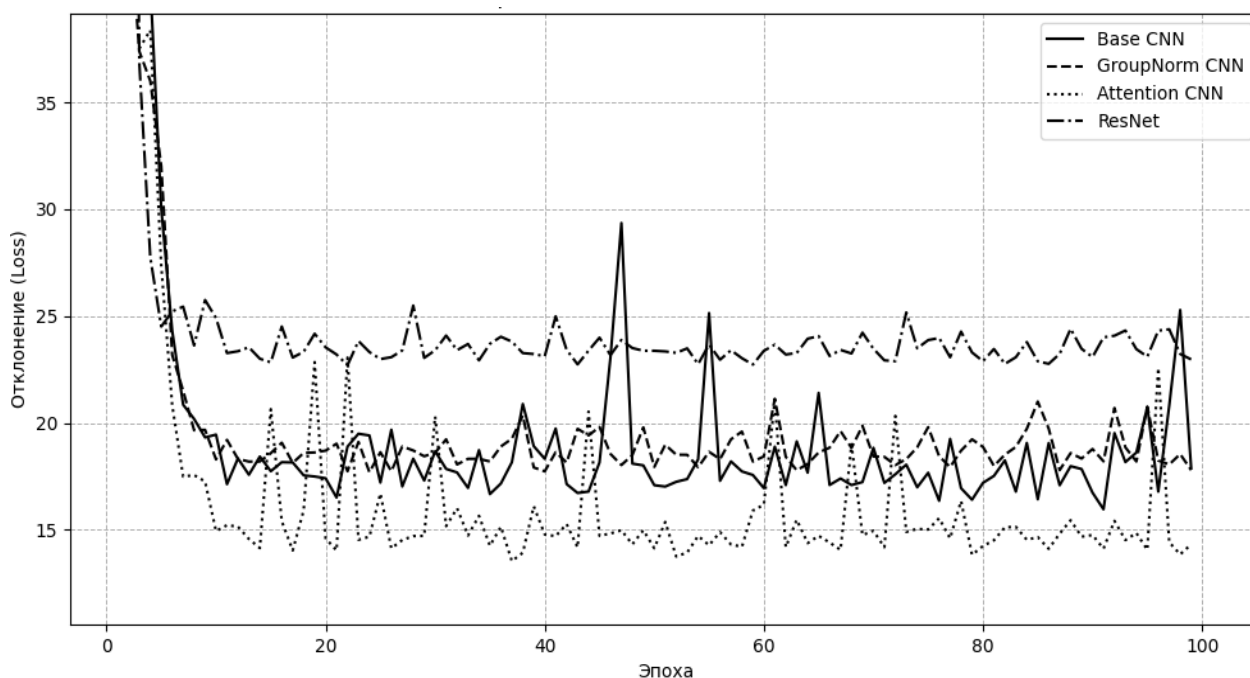


Рис. 1. Сравнение сходимости моделей

Исследование дало нам сделать важный вывод: эффективность архитектур зависит не только от их теоретических возможностей, но и от доступных данных, а также от специфики задачи.

Внедрение настольного приложения для разметки позволило расширить датасет и повысить качество обучения. Этот инструмент также может быть полезен для дальнейших исследований, позволяя привлекать к разметке большее число специалистов из разных медицинских учреждений.

Таким образом, работа подтверждает перспективность применения методов глубокого обучения

для автоматизации анализа телерентгенограмм. Полученные результаты открывают возможности для практического внедрения в ортодонтическую практику.

В перспективе планируется:

- дальнейшее расширение обучающего набора до нескольких тысяч снимков;
- исследование гибридных архитектур, сочетающих ResNet и Attention;
- разработка веб-сервиса, позволяющего автоматизировать процесс анализа ТРГ в клиниках.

Литература

1. Тарабрин Н.Е. Применение нейросетей для анализа телерентгенограмм в стоматологии // Научная сессия ТУСУР–2025: матер. науч.-практ. конф.: в 4 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Ч. 3. – С. 206–208.
2. Ильинский А.В. Глубокое обучение в медицинской визуализации: возможности и перспективы / А.В. Ильинский, В.Е. Сеницын // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2019. – Т. 100, № 6. – С. 373–381.
3. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 770–778.
4. Wu Y. Group normalization / Y. Wu, K. He // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2018. – P. 3–19.
5. Применение искусственных нейронных сетей в практике врача-ортодонта: обзор российских исследова-

ний за период 2013–2023 гг. / А.А. Симакова, М.А. Горбатова, Д.С. Русанов, А.А. Карякин, А.М. Гржибовский // Вестник новых медицинских технологий. – 2024. – 4-е изд.

Суханов Александр Яковлевич

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: saysandr@sibmail.com

Тарабрин Никита Евгеньевич

Студент каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: tarabrinnikita3@gmail.com

Миссия Дарья Александровна

Студентка каф. АСУ ТУСУРа
Эл. почта: dmission@bk.ru

И. Мухамад

Энергоэффективная оптимизация траекторий БПЛА с учётом влияния ветра

Предложен метод оптимизации траектории полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для максимального числа достигнутых контрольных точек с ограничением энергетических ресурсов. Используется иерархическая кластеризация и двухуровневая Deep Q-Network (DQN)-архитектура, где верхний уровень выбирает кластер, а нижний – оптимальную траекторию внутри него. Симуляции показали, что алгоритм ЭЭИОТ быстрее и энергоэффективнее базового DQN, стабильно работает при турбулентности до 14 узлов и позволяет минимизировать энергозатраты. Результаты подтверждают его потенциал для надёжной оптимизации траекторий в реальных условиях.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, оптимизация траектории, глубокое обучение с подкреплением.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) сегодня играют ключевую роль в самых разных областях, включая экологический мониторинг, доставку грузов и другие применения [1]. Их эксплуатация ограничена доступными энергетическими и вычислительными ресурсами, что требует разработки эффективных методов планирования полёта. Для решения этих проблем в литературе предлагаются как математические аппроксимации для неконвексных задач [2], так и алгоритмы на основе обучения с подкреплением [3, 4]. Особую актуальность методы обучения с подкреплением приобретают в условиях динамически изменяющейся внешней среды, включая такие факторы, как влияние ветра, которое существенно сказывается на траектории полёта и энергозатратах БПЛА.

Системная модель

Рассматриваемая система (рис. 1) предполагает использование БПЛА для сбора данных с множества контрольных точек M с целью экологического мониторинга. При планировании маршрута БПЛА необходимо максимально увеличить число достигнутых контрольных точек, не превышая при этом заданный энергетический лимит $E_{\max}$.

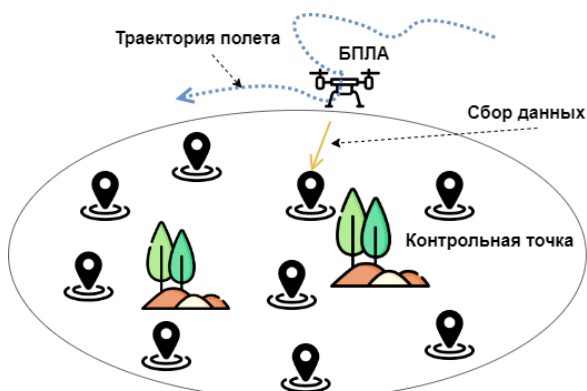


Рис. 1. Системная модель

Для моделирования полёта временной горизонт T разделяется на N дискретных интервалов одинаковой продолжительности. Каждый временной слот i соответствует промежутку времени $\Delta = |t^{i+1} - t^i|$. По-

лёт начинается из стартовой позиции $q_s = (x_s, y_s)$, а завершиться должен в конечной точке $q_e = (x_e, y_e)$. Движение БПЛА ограничено максимальной скоростью $v_{\max}$, при этом он сохраняет фиксированную высоту полёта H_0 . Положение БПЛА в момент времени t^i задаётся как $q[t^i]$.

Энергетическая модель

Для расчёта энергозатрат используется модель энергопотребления, описанная в работе [5]. В соответствии с ней, энергия, затрачиваемая БПЛА, определяется следующей формулой:

$$E = \sum_{i=1}^N P_b \left(\sqrt{1 + \frac{|v^i|^4}{4v_0^4}} - \frac{|v^i|^2}{2v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \sum_{i=1}^N \left(P_0 + \frac{3P_0 |v^i|^2}{U_{tip}^2} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A |v^i|^3 \right), \quad (1)$$

где P_0 обозначает индуцированную мощность, а P_b соответствует мощности, связанной с сопротивлением профиля лопастей. Величина U_{tip} представляет собой линейную скорость на концах ротора, а v_0 – индуцированную скорость потока, создаваемого ротором. Константы d_0 , ρ , s и A отражают влияние параметров окружающей среды и аэродинамических характеристик конструкции БПЛА.

Модель ветра

Существенным элементом рассматриваемой системы является учёт ветровых воздействий, поскольку они оказывают прямое влияние на траекторию полёта БПЛА. Наличие ветровых потоков приводит к необходимости корректировки курса и скорости движения, что отражается на энергопотреблении и возможности достижения запланированных контрольных точек.

Турбулентность представляет собой случайные колебания, накладывающиеся на средний поток ветра. Она возникает в результате таких факторов, как тепловой обмен и сдвиг ветра. Для описания турбулентных составляющих в настоящем исследовании

применяется модель Драйдена [6], спектральная функция которой задаётся выражением

$$w_t(s) = \begin{cases} \Phi_u(s) = \sigma_u \sqrt{\frac{2L_u}{\pi V}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_u}{V}s}, \\ \Phi_v(s) = \sigma_v \sqrt{\frac{L_v}{\pi V}} \cdot \frac{1 + \frac{\sqrt{3}L_v}{V}s}{\left(1 + \frac{L_v}{V}s\right)^2}, \\ \Phi_w(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{L_w}{\pi V}} \cdot \frac{1 + \frac{\sqrt{3}L_w}{V}s}{\left(1 + \frac{L_w}{V}s\right)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где σ_u , σ_v и σ_w – интенсивности турбулентности, L_u , L_v и L_w – характерные длины турбулентного потока в трёх ортогональных направлениях, а V – скорость полёта БПЛА относительно воздуха.

При высотах менее 1 000 футов параметры турбулентности определяются следующими соотношениями:

$$L_w = h, \quad L_u = L_v = \frac{h}{(0,177 + 0,000823h)^{1,2}},$$

$$\sigma_w = 0,1W_{20}, \quad \frac{\sigma_u}{\sigma_w} = \frac{\sigma_v}{\sigma_w} = \frac{1}{(0,177 + 0,000823h)^{0,4}},$$

где h – высота полёта БПЛА, а W_{20} – скорость ветра, измеряемая на высоте 20 футов и используемая для расчёта интенсивностей турбулентности.

Формулировка задачи

Для каждой контрольной точки m вводится индикаторная функция $k_m[t^i]$, отражающая факт её достижения БПЛА в момент времени t^i . Суммарное значение: $k_m = \sum_{i=1}^N k_m[t^i]$, $\forall m \in M$, показывает, была ли точка m достигнута в течение всего маршрута.

Обозначим через $Q = \{q[t^i], 1 \leq i \leq N\}$ множество позиций БПЛА в каждом временном слоте. Тогда задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$(P1): \max_Q \sum_{m \in M} k_m, \quad (3a)$$

$$\text{при условии: } E(q[t^i]) \leq E_{\max}, \quad (3b)$$

$$q[t^1] = q_s, q[t^N] = q_e, \quad (3c)$$

$$\|q[t^{i+1}] - q[t^i]\| \leq \Delta v_{\max}, \quad (3d)$$

$$k_m \leq 1, \forall m \in M. \quad (3e)$$

Здесь (3b) гарантирует, что суммарные энергозатраты не превышают максимально допустимое значение $E_{\max}$. Условие (3c) фиксирует начальную позицию БПЛА q_s и конечную точку маршрута q_e . Ограничение (3d) накладывает предел на скорость движения, не позволяя превышать $v_{\max}$. Наконец,

условие (3e) обеспечивает, что каждая контрольная точка может быть достигнута не более одного раза.

Предлагаемое решение

Задача (3) является неконвексной и комбинаторно сложной из-за нелинейных ограничений и бинарных переменных k_m . Для снижения вычислительной сложности используется иерархическая кластеризация: множество контрольных точек M разбивается на кластеры $C = \{C_1, C_2, \dots, C_J\}$ с порогом максимального расстояния $d_{\max}$. После разбиения исходная задача декомпозируется на подзадачи, каждая из которых находит оптимальную траекторию внутри кластера. Пусть $Q^* = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_J\}$ множество траекторий, соответствующих каждому кластеру, где цель j -й подзадачи – максимизировать количество посещённых точек маршрута внутри кластера C_j . Таким образом, задача (3) может быть декомпозирована в набор меньших подзадач $P2 = \{P2_1, P2_2, \dots, P2_J\}$, где цель подзадачи $P2_j$ заключается в максимизации числа посещённых точек кластера C_j при выполнении ограничений (3).

Для решения данной задачи был разработан энергоэффективный иерархический алгоритм оптимизации траектории (ЭЭИОТ) на основе DQN. Алгоритм состоит из двух шагов: 1) иерархическая кластеризация разбивает задачу на подзадачи $P2$; 2) каждая подзадача решается с помощью иерархической DQN-архитектуры, использующей две стратегии управления. На верхнем уровне стратегия π_0 выбирает кластер для исследования, а на нижнем уровне стратегия π_1 определяет оптимальную траекторию внутри выбранного кластера, максимизируя число достигнутых точек.

Состояния. Оба уровня стратегии используют общее состояние: остаток энергии и уже достигнутые точки. Верхний уровень дополнительно учитывает информацию о кластерах (число достигнутых точек, оценку требуемой энергии, статус подзадачи), а нижний – энергоёмкость перехода к каждой точке и ожидаемый остаток энергии.

Действия. Стратегия высокого уровня выбирает кластер, а низкого – конкретную точку внутри него. Для исключения некорректных решений применяется маскирование действий (нельзя выбрать завершённый кластер, уже отработанную точку или точку вне текущего кластера).

Вознаграждение. Верхний уровень получает положительное вознаграждение за успешное выполнение подзадачи, ноль – за частичное, и -1 – при полном расходовании энергии или неудаче (4). Нижний уровень стимулируется за экономию энергии и полное покрытие точек внутри кластера (5).

$$r_h[t^i] = \begin{cases} 1 & \text{если } \sum_{m \in C_j} \sum_{i=1}^N k_m[t^i] = |C_j|, \\ 0 & \text{если } \sum_{m \in C_j} \sum_{i=1}^N k_m[t^i] < |C_j|, \\ -1 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

$$r_l[t^i] = \begin{cases} \frac{E_{\max} - E[t^i]}{E_{\max}} & \text{если } E[t^i] < E_{\max}, \\ -1 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Настройка симуляции и результаты

Для проверки алгоритма разработана симуляционная среда на Python с использованием RLib и Gymnasium. Рассматривается квадратная область 500×500 м с 40 случайно распределёнными контрольными точками. БПЛА начинает и завершает поставленную задачу в центре области. Основные параметры приведены в таблице. Для моделирования турбулентности применена Python-реализация модели Драйдена [6].

Параметры симуляции

Δ , с	$E_{\max}$, Вт·ч	$v_{\max}$, м/с	v_0 , м/с	U_{tip} , м/с	ρ , кг/м ³
5	20	5,0	0,002	120,0	1,225
P_b , Вт	P_0 , Вт	A , м ²	H_u , м	d_0	s
120,16	99,66	0,5	100	0,48	0,0001

Задача (3) решается двумя методами: базовым DQN и предложенным ЭЭИОТ. В обоих случаях используется одинаковая архитектура сети; отличие в том, что базовый DQN рассматривает все контрольные точки как один кластер, тогда как ЭЭИОТ использует иерархический подход.

Сравнение алгоритмов. На рис. 2 показано сравнение работы алгоритмов без учёта влияния ветра при $d_{\max} = 200$ м.

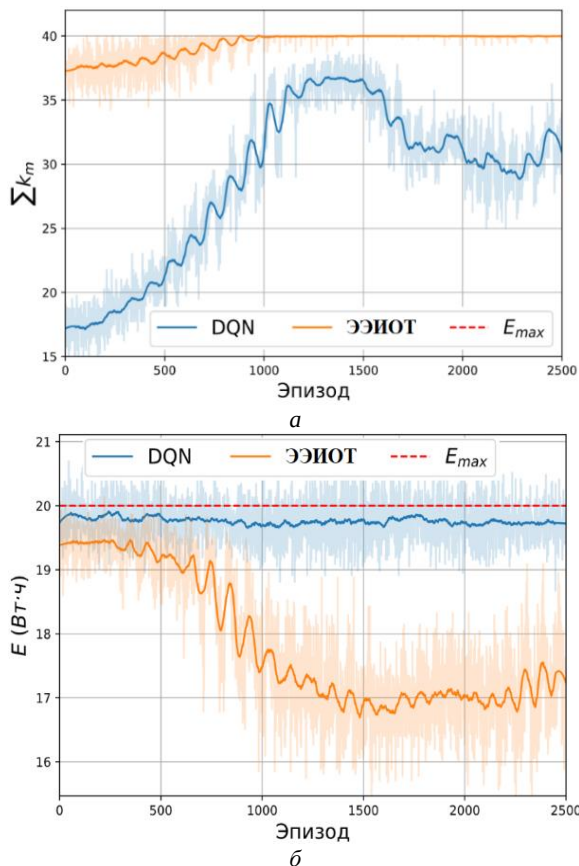


Рис. 2. Сравнение между DQN и предложенным ЭЭИОТ по показателям: а – потребленная энергия, б – общее количество достигнутых контрольных точек

ЭЭИОТ достигает все контрольные точки быстрее (см. рис. 2, а) и более эффективно использует энергию, демонстрируя снижение энергозатрат при сохранении высокой производительности (см. рис. 2, б). В отличие от него базовый DQN также достигает всех точек, но делает это значительно медленнее и с большим расходом энергии.

Влияние $d_{\max}$. Эксперименты с разными значениями $d_{\max}$ показали, что ЭЭИОТ стабильно достигает почти все контрольные точки за исключением случая $d_{\max} = 50$ м (рис. 3, а). Слишком малое или слишком большое $d_{\max}$ увеличивает число эпизодов для обучения. Наилучший результат достигается при $d_{\max} = 200$ м, когда алгоритм достигает все точки примерно за 100 эпизодов.

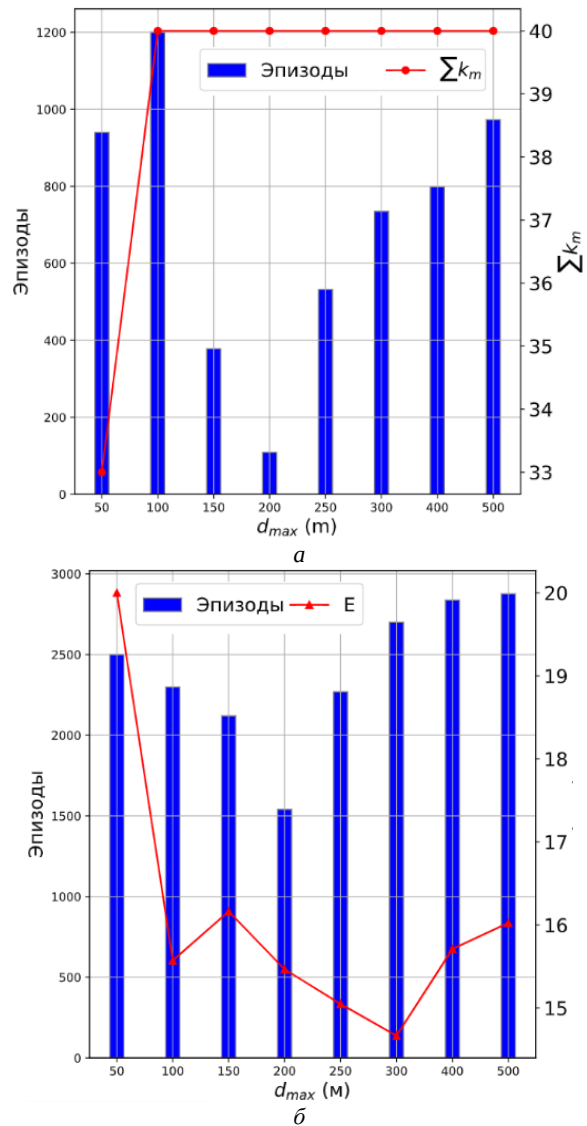


Рис. 3. Влияние максимального расстояния иерархической кластеризации $d_{\max}$ на алгоритм ЭЭИОТ: а – наилучшее достигнутое значение Σk_m при различных значениях $d_{\max}$, б – наилучшее минимизированное значение E при различных значениях $d_{\max}$ при достижении наилучшего Σk_m

Как видно на рис. 3, б, ЭЭИОТ требует больше эпизодов для минимизации энергозатрат при сохранении максимального числа достигнутых точек. Это

показывает, что хотя $d_{\max} = 200$ м обеспечивает оптимальный баланс между количеством эпизодов и охватом, достижение максимальной энергоэффективности требует дополнительного времени.

Влияние ветра. Для постоянного ветра задан вектор $w_c = [1, 0; 1, 0; 1, 0]$ м/с, максимальная энергоёмкость БПЛА – $E_{\max} = 30$ Вт·ч, а порог кластеризации точек – $d_{\max} = 200$ м. Турбулентный компонент моделируется с параметром W_{20} от 0 до 25 узлов (0–12,9 м/с), охватывая условия от спокойного воздуха до свежего бриза. На рис. 4 показано, что при $W_{20} > 14$ узлов, ЭЭИОТ теряет способность эффективно снижать энергопотребление (см. рис. 4, а) и достигать более 30 контрольных точек (см. рис. 4, б). При турбулентности ниже 14 узлов алгоритм остаётся работоспособным, но время сходимости увеличивается с ростом интенсивности ветра. Увеличение $E_{\max}$ выше 30 Вт·ч позволит сохранить производительность и снизить энергозатраты при сильном ветре.

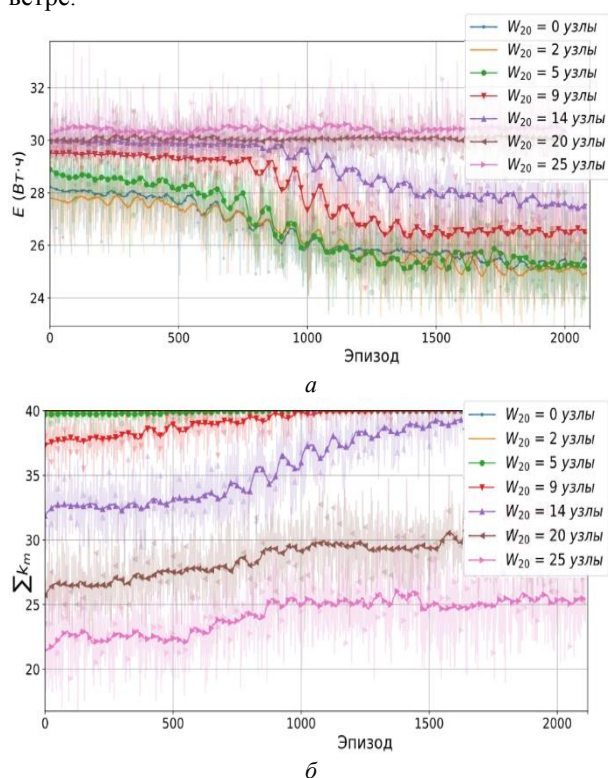


Рис. 4. Работа алгоритма ЭЭИОТ при различных уровнях турбулентности и максимальной скорости 5 м/с

Заключение

В данной работе предложен новый метод оптимизации траектории БПЛА на основе глубокого обучения с подкреплением – алгоритм ЭЭИОТ.

Использование иерархической кластеризации позволяет эффективно максимизировать количество достигнутых контрольных точек при минимальном энергопотреблении, обеспечивая более быструю сходимость по сравнению с базовым DQN. Проведённые симуляции показали, что ЭЭИОТ сохраняет высокую производительность при ветровой турбулентности до 14 узлов, а при более сильном ветре эффективность снижается, что может быть компенсировано увеличением энергетической ёмкости БПЛА.

Полученные результаты подтверждают потенциал ЭЭИОТ для энергосберегающей и надёжной оптимизации траекторий в условиях реального ветра. В будущей работе планируется исследовать влияние скорости полёта БПЛА на снижение эффекта ветровой турбулентности и повышение стабильности алгоритма.

Литература

1. Jiang X. Green uav communications for 6g: A survey / X. Jiang, M. Sheng, N. Zhao // Chinese Journal of Aeronautics. – 2022. – Vol. 35, No. 9. – P. 19–34.
2. Samir M. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices / M. Samir, S. Sharafeddine, C.M. Assi // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 34–46.
3. Amrallah A. UAV trajectory optimization in a post-disaster area using dual energy-aware bandits / A. Amrallah, E.M. Mohamed, G.K. Tran // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 3.
4. Qin Z. The UAV trajectory optimization for data collection from time-constrained IoT devices: A hierarchical deep q-network approach / Z. Qin, X. Zhang, B. Zhang // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 5.
5. Zeng Y. Energy Minimization for Wireless Communication with Rotary-Wing UAV / Y. Zeng, J. Xu, R. Zhang // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 18, No. 4. – P. 2329–2345.
6. Abichandani P. Wind Measurement and Simulation Techniques in Multi-Rotor Small Unmanned Aerial Vehicles / P. Abichandani, D. Lobo, G. Ford // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 54910–54927.

Мухамад Ибрагим

Аспирант инженерной школы
информационных технологий и робототехники (ИШИТР)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
ORCID: 0000-0003-1569-5493
Эл. почта: ibragim1@tpu.ru

А.К. Новохрѣстов, С.В. Чиндин, А.А. Занько, Н.Г. Праскурин

Модель угроз аутентичности на сетевом и логическом уровнях представления компьютерных сетей

Рассматриваются информационные модели объектов информатизации на сетевом и логическом уровнях представления компьютерных сетей, а также характерные для них угрозы аутентичности. В основе анализа лежит формализация объектов и связей как элементов многоуровневой модели, что позволяет выявить уязвимости и отразить возможные воздействия. Особое внимание уделено классификации угроз по видам воздействий на объекты и связи (подмена, удаление, добавление, изменение), которая обеспечивает удобное представление сценариев атак в рамках модели. Показаны различия между угрозами сетевого уровня, связанными с IP-адресацией и протоколами взаимодействия, и угрозами логического уровня, где ключевую роль играют доменные структуры, учётные записи и механизмы прикладной аутентификации. Описаны примеры нарушений подлинности и их последствия для функционирования сети.

Ключевые слова: компьютерные сети, аутентичность, угрозы информационной безопасности, сетевой уровень, логический уровень.

Современные информационные системы функционируют в условиях постоянного взаимодействия между множеством объектов – от физических устройств до прикладных сервисов. Их объединение в компьютерные сети создаёт не только широкие возможности для обработки и обмена данными, но и новые угрозы информационной безопасности.

Особое место среди таких угроз занимает нарушение аутентичности – способности подтверждать подлинность объектов и связей. Подлинность определяет доверие к пользователям, устройствам и сервисам, а её компрометация открывает путь для подмены, внедрения ложных объектов и искажения процессов взаимодействия [1, 4].

Для анализа угроз используется многоуровневое представление компьютерных сетей. Нижний уровень связан с физической средой передачи (оборудование, линии связи), сетевой – с сетевыми взаимодействиями на основе IP-адресов и протоколов, верхний (логический) – с доменными структурами, учётными записями и прикладными протоколами. В данной статье внимание сосредоточено на сетевом и логическом уровнях, поскольку именно они формируют основу киберпространства, где реализуется подавляющее большинство атак [6].

Сетевой уровень представления сети

Сетевой уровень охватывает объекты и связи, идентифицируемые через IP-адресацию и сетевые протоколы. Объектами являются рабочие станции, серверы и сетевые устройства под управлением операционных систем (Windows, Linux и др.). Типичными связями выступают протоколы TCP/IP, HTTP/HTTPS, SSH, RDP, обеспечивающие установление и поддержание коммуникаций.

Атрибуты объектов сетевого уровня включают:

- сетевые настройки (IP-адрес, маска, шлюз);
- доступные сервисы;
- поддерживаемые протоколы;
- сетевые идентификаторы ОС.

На рис. 1 представлена схема сетевого уровня, иллюстрирующая взаимодействие рабочих станций и серверов через IP-пространство [7].

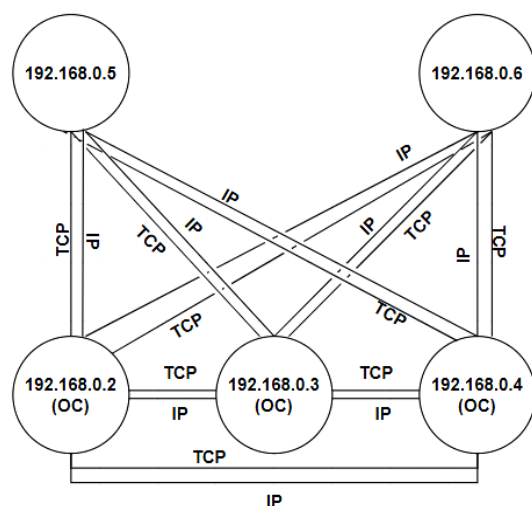


Рис. 1. Сетевой уровень представления сети

Угрозы аутентичности на сетевом уровне включают:

- подмену IP-адреса (ARP-spoofing, IP-cloning);
- внедрение ложных маршрутов и прокси (DNS-spoofing, rogue gateway);
- удаление объектов из сети (блокировка, DoS-атаки);
- добавление несанкционированных узлов (rogue device);
- изменение конфигураций и сервисов сетевых устройств.

Формализованный перечень угроз аутентичности для сетевого уровня представлен в табл. 1 [3, 5].

Логический уровень представление сети

Логический уровень отражает организацию взаимодействия в терминах доменных структур и прикладных протоколов. Идентификаторами объектов здесь являются доменные имена, учётные записи пользователей, а также логическая принадлежность к доменам и группам безопасности.

Типичные объекты логического уровня [4]:

- учётные записи пользователей;

- рабочие станции и серверы в домене;
- файловые хранилища и сетевые принтеры.

Основные связи:

- членство в доменах и группах Active Directory;
- протоколы FTP, SMB, LDAP, Kerberos и др.;
- политики безопасности и доверительные отношения.

На рис. 2 представлена структура логического уровня, демонстрирующая связи между пользователями и сервисами в доменной среде [7].

Угрозы аутентичности логического уровня включают:

- компрометацию учётных записей (кража паролей, токенов, билетов Kerberos);
- добавление фиктивных пользователей или сервисных аккаунтов;
- удаление легитимных объектов (например, учётных записей администраторов);
- изменение ролей, прав доступа или групповых политик.

В табл. 2 приведён систематизированный перечень угроз логического уровня [3, 5].

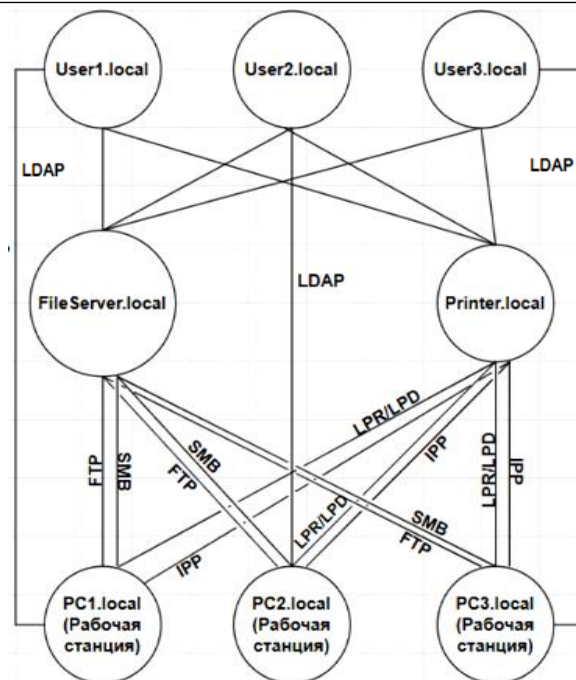


Рис. 2. Логический уровень представления сети

Таблица 1

Угрозы для сетевого уровня

Класс угроз	Объект / связь	Угроза
Cs1X (подмена объекта)	Рабочая станция	Подмена IP-адреса рабочей станции через ARP-спуфинг для имитации легитимного узла
	Сервер	Развёртывание поддельного сервера с подменённым IP-адресом для перехвата сетевых запросов
	Принтер	Имитация сетевого принтера с идентичным IP-адресом для перехвата заданий печати
Cs1E (подмена связи)	HTTP-протокол	Перехват HTTP-сессии через атаку «человек посередине» на незащищённый канал (без HTTPS)
	SSH-протокол	Подмена SSH-соединения путём эксплуатации слабого ключа шифрования для доступа к серверу
	RDP-протокол	Фальсификация RDP-сессии через подмену сертификата для перехвата учётных данных
Cs2X (удаление объекта)	Рабочая станция	Деактивация рабочей станции путём удаления её сетевой конфигурации через эксплойт ОС
	Сервер	Отключение сервера от сети через несанкционированное изменение маршрутизации IP
	Принтер	Сброс конфигурации принтера до заводских настроек через уязвимость в сетевом протоколе
Cs2E (удаление связи)	TCP / IP-протокол	Блокировка TCP/IP-трафика через фильтрацию пакетов на уровне сетевого интерфейса
	HTTPS-протокол	Прерывание HTTPS-соединения путём отключения службы веб-сервера
	SSH-протокол	Отключение SSH-доступа через изменение конфигурации межсетевого экрана ОС
Cs3X (добавление объекта)	Рабочая станция	Добавление поддельной рабочей станции с новым IP-адресом для выполнения атак в сети
	Сервер	Внедрение несанкционированного сервера с IP-адресом для перехвата сетевого трафика
	Принтер	Развёртывание поддельного принтера с IP-адресом для сбора заданий печати
Cs3E (добавление связи)	TCP / IP-протокол	Установка скрытого TCP/IP-канала для эксфильтрации данных через туннелирование
	HTTP-протокол	Создание несанкционированного HTTP-соединения для передачи данных на подконтрольный сервер
	RDP-протокол	Внедрение поддельного RDP-соединения для удалённого управления устройством
Cs4X (изменение объекта)	Рабочая станция	Изменение IP-конфигурации рабочей станции для перенаправления трафика на подконтрольный узел
	Сервер	Модификация сетевых настроек сервера для обхода политик безопасности ОС
	Принтер	Компрометация прошивки принтера через уязвимость ОС для внедрения вредоносного кода
Cs4E (изменение связи)	TCP / IP-протокол	Модификация TCP/IP-пакетов для подмены данных через инъекцию в сетевой трафик
	HTTPS-протокол	Изменение параметров HTTPS-соединения для обхода проверки сертификатов
	SSH-протокол	Компрометация SSH-соединения путём внедрения вредоносного кода в передаваемые данные

Угрозы для логического уровня

Класс угроз	Объект / связь	Угроза
Cs1X (подмена объекта)	Учётная запись пользователя	Создание поддельной учётной записи в Active Directory с привилегиями администратора путём эксплуатации слабых политик паролей
	Файловый сервер	Развёртывание поддельного файлового сервера с идентичным NetBIOS-именем для перехвата SMB-сессий
	Рабочая станция	Подключение скомпрометированной рабочей станции к домену с подменённым SID для выполнения несанкционированных запросов
Cs1E (подмена связи)	LDAP-протокол	Перехват LDAP-аутентификации путём подмены ответа сервера через атаку на незащищённый канал (без LDAPS)
	SMB-протокол	Подмена SMB-соединения через NTLM Relay для перенаправления учётных данных на подконтрольный сервер
	FTP-протокол	Фальсификация FTP-сессии путём эксплуатации слабого шифрования (FTPS с устаревшим TLS) для перехвата данных
Cs2X (удаление объекта)	Учётная запись пользователя	Удаление учётной записи пользователя из Active Directory через несанкционированный доступ к контроллеру домена
	Файловый сервер	Деактивация файлового сервера путём отключения его сетевого интерфейса
	Принтер	Уничтожение конфигурации принтера через сброс до заводских настроек с использованием уязвимого протокола IPP
Cs2E (удаление связи)	LDAP-протокол	Блокировка LDAP-соединения путём фильтрации трафика на сетевом оборудовании
	SMB-протокол	Прерывание SMB-доступа через отключение общего ресурса на сервере
	FTP-протокол	Отключение FTP-протокола путём изменения конфигурации межсетевого экрана
Cs3X (добавление объекта)	Учётная запись пользователя	Добавление несанкционированной учётной записи в Active Directory для скрытого мониторинга сети
	Принтер	Внедрение поддельного принтера в сеть для перехвата заданий печати через IPP
	Рабочая станция	Развёртывание несанкционированной рабочей станции в домене для выполнения атак на сетевые ресурсы
Cs3E (добавление связи)	LDAP-протокол	Установка скрытого LDAP-канала для эксфильтрации учётных данных
	SMB-протокол	Создание несанкционированного SMB-соединения для передачи данных на подконтрольный сервер
	FTP-протокол	Внедрение поддельного FTP-сервера в сеть для сбора передаваемых файлов
Cs4X (изменение объекта)	Учётная запись пользователя	Изменение привилегий учётной записи в Active Directory для предоставления несанкционированного доступа
	Файловый сервер	Модификация конфигурации файлового сервера для перенаправления SMB-трафика на подконтрольный ресурс
	Принтер	Компрометация прошивки принтера для внедрения вредоносного кода
Cs4E (изменение связи)	LDAP-протокол	Модификация LDAP-запроса для подмены данных аутентификации
	SMB-протокол	Изменение параметров SMB-протокола для перенаправления трафика на поддельный сервер
	FTP-протокол	Компрометация FTP-соединения путём внедрения вредоносного кода в передаваемые данные

Классификация угроз аутентичности Cs

При рассмотрении угроз аутентичности в рамках информационной модели компьютерных сетей важно опираться на формализованный подход, позволяющий не только перечислять угрозы, но и описывать их как операции над структурой модели. В качестве такого инструмента выбрана классификация Cs, так как она наглядно связывает угрозы с воздействием на объекты и связи, что соответствует принципам построения информационных моделей. Классификация Cs задаётся в формате Cs[n][X/E], где X означает объект, E – связь, а номер соответствует типу воздействия [2]: 1 – подмена, 2 – удаление, 3 – добавление, 4 – изменение.

Применительно к сетевому и логическому уровням это выражается следующим образом:

- Cs1X (подмена объекта): IP- или ARP-спуфинг на сетевом уровне; компрометация учётной записи на логическом.

- Cs1E (подмена связи): атаки MITM, перехват трафика; на логическом уровне – подмена доменных связей или токенов.

- Cs2X (удаление объекта): отключение узла из сети, DoS-атаки; удаление пользователей или сервисов в домене.

- Cs2E (удаление связи): блокировка маршрутов; исключение из групп безопасности или разрыв доверительных отношений.

- Cs3X (добавление объекта): подключение неавторизованных устройств; создание фиктивных аккаунтов.

- Cs3E (добавление связи): внедрение ложных маршрутов; добавление пользователей в группы с повышенными правами.

- Cs4X (изменение объекта): модификация конфигураций устройств; изменение атрибутов учётных записей.

- Cs4E (изменение связи): подмена маршрутов, изменение политик авторизации.

Использование классификации Cs в информационной модели делает возможным представление угроз в виде операций над множеством объектов и связей: замена вершины графа, удаление дуги, добавление нового элемента или изменение атрибутов.

Такой подход упрощает систематизацию угроз и их последующее моделирование средствами формальной логики или метаграфов.

Заключение

В ходе проведённого исследования была построена информационная модель объектов информатизации на сетевом и логическом уровнях представления компьютерных сетей. Для каждого уровня выделены характерные объекты, их атрибуты и связи, что позволило формализовать структуру системы и соотнести её с возможными угрозами аутентичности.

На основе выбранной классификации угрозы были систематизированы как операции над элементами модели: подмена, удаление, добавление и изменение объектов и связей. Такой подход показал, что сетевой уровень подвержен угрозам, связанным с корректностью транспортных протоколов и маршрутов, а логический – с подлинностью учётных записей, доменных структур и прикладных сервисов.

Литература

1. Молдавская экономическая академия. Лаборатория информационной безопасности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://securityasemd/publ/ru/pubru61.html> (дата обращения: 05.08.2025).
2. Новохрестов А.К. Модель угроз информационной безопасности программного обеспечения компьютерных сетей на основе атрибутивных метаграфов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. – Томск: ТУСУР, 2018. – 20 с.
3. Вяткина А. Актуальные киберугрозы: I–II кварталы 2025 года / А. Вяткина, А. Осипова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktual-nye-kiberugrozy-i-ii-kvartaly-2025-goda/> (дата обращения: 05.08.2025).

4. Петровская О.В. Недостоверность информации как угроза информационной безопасности // Мониторинг правоприменения. – 2022. – № 2 (43). – С. 94–99. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-2-94-99.

5. Novokhrestov A. Model of Threats to Computer Network Software / A. Novokhrestov, A. Konev, A. Shelupanov // Symmetry. – 2019. – Vol. 11, Is. 12. – P. 1506.

6. Новохрестов А.К. Оценка качества защищенности компьютерных сетей / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 85–87.

7. Сетевая модель OSI / Л.Т. Линь, Б.М. Дык, Н.Н. Хуи, Н.Д. Чыонг, Н.Б. Хю, Л.Ч. Хыонг // Научные исследования. – 2017. – № 1 (12). – С. 15–18.

Новохрестов Алексей Константинович

Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: aleksei.k.novokhrestov@tusur.ru

Чиндин Семён Валерьевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: wkamanw@yandex.ru

Занько Андрей Александрович

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: zanko-2005@mail.ru

Праскурин Никита Георгиевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: praskurinnikita@gmail.com

А.К. Новохрёстов, М.А. Быстров, А.А. Занько, В.Н. Репников

Модель угроз аутентичности на физическом уровне представления компьютерных сетей

Представлена модель угроз аутентичности на физическом уровне компьютерных сетей. Проведен анализ объектов и связей, подверженных угрозам подмены, удаления, добавления и изменения. Показано, что данные угрозы формируют основу для последующих нарушений на верхних уровнях модели OSI. Сформулированы рекомендации по классификации угроз и обоснована необходимость системного подхода к обеспечению информационной безопасности.

Ключевые слова: компьютерные сети, аутентичность, угрозы информационной безопасности, физический уровень представления.

Аутентичность системы, гарантирующая целостность и защиту от вмешательства, критически важна для доверия и эффективности работы как информационной системы, так и пользователя. Угрозы нарушения аутентичности способны подорвать надёжность информационной системы и доверие пользователей, поэтому поддержание аутентичности системы рассматривается как ключевой фактор безопасности.

Угрозы нарушения аутентичности создают опасность нарушения информационной безопасности системы. Применение систем аутентификации в таких критически важных областях, как банковские транзакции, электронные голосования и медицинские базы данных и не только, порождает ряд угроз. Задачей является составление списка подобных угроз и обоснование полноты данного списка. Нарушение аутентичности системы влечет риски для информационной безопасности, а также экономические, гражданские и репутационные последствия, связанные с восстановлением данных и устранением последствий атак. Именно поэтому важно иметь представление, какие аспекты системы могут быть подвержены угрозам.

Физический уровень представления сети

На пути к защите информационных систем является разработка списка угроз нарушения аутентичности для физической среды. Под физической средой понимается уровень, включающий физические каналы, компьютеры и их физические представления – атрибуты, определяющие эти компоненты.

Нижний/физический уровень – это уровень, на котором именами входящих в него объектов являются MAC-адреса, а связь происходит на основе физического проводного или беспроводного соединения [5].

На физическом уровне каждый компонент имеет в качестве имени свой MAC-адрес. Связь осуществляется за счёт проводного или беспроводного соединения. Три компьютера в данном случае (рис. 1) рассматриваются как сетевые карты, которым и присваивается MAC-адрес. Также на данном уровне осуществляется взаимодействие между аппаратной частью устройств и пользователя, имеющего на это физический доступ [3].

Изображение примера нижнего уровня сети представлено на рис. 1.

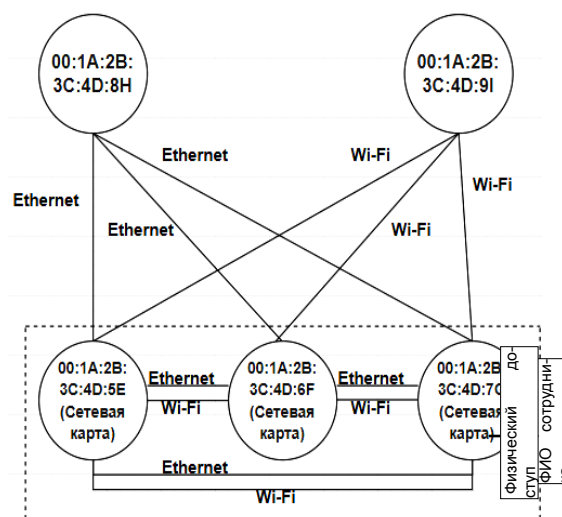


Рис. 1. Физический уровень представления сети

Были рассмотрены типичные объекты информационной системы и связи между ними. Так, для объектов рассматривались следующие атрибуты:

- имя (уникальный идентификатор): MAC-адрес сетевого адаптера (для многоинтерфейсных устройств – набор MAC-адресов);

- аппаратные атрибуты: список установленных сетевых адаптеров (Ethernet, Wi-Fi и др.), серийные номера, заводские ID, версия аппаратной платы/прошивки;

- параметры физического интерфейса: тип и разъём (RJ-45, SFP, оптический кабель), скорость / дуплекс порта, конфигурация порта (access / trunk), характеристики линии (длина, потери, затухание), для беспроводного – частота, ширина канала, мощность [4];

- административные атрибуты: размещение / стойка / полка, владелец / ответственный, статус (активен / включён / выведен из эксплуатации), отметки инвентаризации;

- политики и безопасность: наличие аппаратных средств доверия (TPM, аппаратные модули безопасности), зарегистрированные средства физической аутентификации (RFID, биометрия), отметки о применении межсетевого экрана на уровне устройства.

При рассмотрении угроз аутентичности в рамках информационной модели компьютерных сетей важно опираться на формализованный подход, позволяющий не только перечислять угрозы, но и описывать их как операции над структурой модели. В качестве такого инструмента выбрана классификация угроз разграничения по типу затрагиваемого элемента, так как она наглядно связывает угрозы с воздействием на объекты и связи, что соответствует принципам построения информационных моделей: X обозначает объект (например, компонент, устройство, программный модуль), а E – связь между объектами (канал передачи, логическая зависимость и пр.). Каждой угрозе присвоен уникальный идентификатор в следующем формате: Cs[n][X/E], где [1]

- Cs1X – подмена объекта;
- Cs1E – подмена связи;

- Cs2X – удаление объекта;
- Cs2E – удаление связи;
- Cs3X – добавление объекта;
- Cs3E – добавление связи;
- Cs4X – изменение объекта;
- Cs4E – изменение связи.

Классификация признаётся достаточной, поскольку покрывает практически все типы действий в структуре информационной системы. Был составлен предварительный вариант списка угроз нарушения аутентичности, направленный на физическую среду. В список включены примеры объектов, на которые направлены угрозы, и краткое описание сути каждой угрозы. Список этих угроз нужно расширять для более широкого понимания, какие компоненты информационных систем могут быть подвержены действиям злоумышленников, и не только.

Угрозы для физического уровня

Класс угроз	Объект / связь	Угроза
Cs1X (подмена объекта)	Сетевая карта рабочей станции	Подмена сетевой карты на скомпрометированное устройство с изменённой аппаратной конфигурацией и встроенной логикой обработки данных
	Жесткий диск сервера	Замена жесткого диска на скомпрометированный носитель с модифицированной файловой системой и предустановленным программным обеспечением
	RFID-метка сотрудника	Фальсификация RFID-идентификатора сотрудника с подменёнными уникальными данными и параметрами аутентификации
Cs1E (подмена связи)	Ethernet-кабель	Подмена Ethernet-кабеля на скомпрометированный канал с интегрированным устройством для обработки сетевых сигналов
	Wi-Fi-сигнал	Имитация Wi-Fi-сигнала скомпрометированным источником с поддельными параметрами точки доступа и идентификаторами сети
	USB-соединение	Замена USB-соединения на скомпрометированный интерфейс с модифицированным контроллером и встроенной логикой передачи данных
Cs2X (удаление объекта)	Сервер	Отключение сервера от физической сети путём извлечения всех сетевых и силовых соединений
	Микропроцессор рабочей станции	Уничтожение микропроцессора путём физического воздействия на электрические цепи
	Биометрические данные сотрудника	Удаление биометрических данных сотрудника из хранилища системы контроля доступа
Cs2E (удаление связи)	Ethernet-кабель	Прерывание соединения путём физического разрыва кабеля или разъёмов кабеля
	Wi-Fi-сигнал	Блокировка Wi-Fi-сигнала путём подавления радиосигналов на соответствующей частоте
	USB-интерфейс	Отключение USB-интерфейса путём физического извлечения устройства или порта
Cs3X (добавление объекта)	Сервер	Внедрение несанкционированного шпионского устройства в физический разъём сервера с функцией записи данных
	Принтер	Добавление скомпрометированного принтера в физическую сеть с поддельной аппаратной конфигурацией
	RFID-устройство сотрудника	Включение несанкционированного RFID-идентификатора с уникальными данными для доступа к системе
Cs3E (добавление связи)	Ethernet-адаптер	Внедрение несанкционированного Ethernet-интерфейса с дополнительным сетевым адаптером и конфигурацией
	Wi-Fi-точка доступа	Создание скомпрометированной Wi-Fi-точки доступа с поддельными идентификаторами и параметрами соединения
	USB-устройство	Добавление несанкционированного USB-интерфейса с модифицированным устройством для обмена данными
Cs4X (изменение объекта)	Сетевая карта рабочей станции	Модификация прошивки сетевой карты с изменением функциональных параметров и логики обработки пакетов
	Прошивка принтера	Изменение прошивки принтера с внедрением дополнительных функций и модифицированной конфигурации
	Биометрические данные сотрудника	Модификация биометрических данных в системе с заменой зарегистрированных параметров идентификации
Cs4E (изменение связи)	Ethernet-кабель	Модификация Ethernet-канала с внедрением устройства для изменения структуры передаваемых сигналов
	Wi-Fi-сигнал	Изменение конфигурации Wi-Fi-сигнала с подменой параметров точки доступа и протоколов связи
	USB-интерфейс	Модификация USB-канала с внедрением устройства для изменения формата и содержания передаваемых данных

Заключение

В ходе исследования построена информационная модель физического уровня представления компьютерной сети, в которой физические компоненты и каналы описаны как атрибутивный метаграф. Показано, что основные сценарии атак можно классифицировать по четырём видам воздействия: подмена, удаление, добавление и изменение объектов или связей. Для каждого класса приведены примеры воздействия на элементы информационной системы и продемонстрированы возможные последствия. Сформированная классификация подтверждает её достаточность для описания большинства угроз аутентичности, а также подчёркивает необходимость комплексного подхода к обеспечению информационной безопасности на всех уровнях сети [6].

Литература

1. Novokhrestov A. Model of Threats to Computer Network Software / A. Novokhrestov, A. Konev, A. Shelupanov // Symmetry. – 2019. – Vol. 11, Is. 12. – P. 1506.
2. Novokhrestov A. Computer network threat modelling / A. Novokhrestov, A. Konev, A. Shelupanov, A. Buymov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1488. – P. 012002.
3. Новохрестов А.К. Модель угроз информационной безопасности программного обеспечения компьютерных сетей на основе атрибутивных метаграфов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19. – Томск: ТУСУР, 2018. – 20 с.
4. A novel physical layer assisted authentication scheme for mobile wireless sensor networks / Q. Wang, S.C. Mukho-

padhyay, H. Ghayvat, N.K. Suryadevara // Sensors. – 2017. – Vol. 17, No. 2. – Art. 289. DOI: 10.3390/s17020289.

5. Using the physical layer for wireless authentication in time-variant channels / L. Xiao, L. Greenstein, N. Mandayam, W. Trappe // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2008. – Vol. 7, No. 7. – P. 2571–2579. DOI: 10.1109/TWC.2008.070416.

6. Key generation from wireless channels: a review / J. Zhang, T.Q. Duong, A. Marshall, R. Woods // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 614–626. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2521718.

Новохрестов Алексей Константинович

Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: aleksei.k.novokhrestov@tusur.ru

Быстров Михаил Алексеевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: mikhail.bystrov.05@gmail.com

Занько Андрей Александрович

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: zanko-2005@mail.ru

Репников Владимир Николаевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: repnikov.2005@mail.ru

А.А. Олифиренко

Адаптивная калибровка порога аномальности в Isolation Forest для предотвращения атак отравления данных в федеративном обучении

Рассматривается прикладной вопрос практической защиты федеративного обучения от атак отравления данных: выбор и калибровка порога аномальности в алгоритме Isolation Forest при использовании его как внешнего фильтра перед робастной агрегацией. Показано, что фиксированный порог приводит либо к избыточному удалению доброкачественных обновлений при малом числе клиентов, либо к пропуску согласованных атак. Предлагается простая адаптивная схема на основе квантиля распределения аномальных баллов по «чистому» скользящему окну, а также согласованная настройка параметров усеченного взвешенного усреднения.

Ключевые слова: федеративное обучение, отравление данных, Isolation Forest, порог аномальности, усеченное взвешенное усреднение, робастная агрегация.

Федеративное обучение предполагает, что исходные записи остаются на стороне клиента, а сервер агрегирует только локальные обновления модели [1]. Это решает задачу приватности, но создает уязвимость: сервер не видит первичные данные и вынужден полагаться на статистику, которую атакующий может целенаправленно искажать [2]. В атаках отравления данных часть клиентов модифицирует разметку и/или признаки так, чтобы сдвиг наступал постепенно и оставался незаметным на уровне отдельного клиента [3]. В финансовых потоках это особенно болезненно: даже небольшой, но систематический дрейф приводит к росту пропусков мошенничества и ложных срабатываний [4].

Рабочий контур защиты строится в два слоя. Сначала выполняется внятная фильтрация подозрительных обновлений с помощью детектора аномалий, затем оставшиеся агрегируются робастно, без доминирования единичных клиентских шагов [5]. В качестве детектора используется Isolation Forest (IF), который оценивает «легкость изоляции» точки в случайных деревьях. Балл аномальности задается классической для IF формулой

$$S(x) = 2 \frac{E[h(x)]}{c(n)},$$

где $E[h(x)]$ – средняя длина пути до объекта в ансамбле деревьев, $c(n)$ – нормировочный коэффициент, зависящий от объема обучающей выборки IF. Чем меньше $S(x)$, тем объект «нормальнее» относительно текущей массы обновлений; высокие значения сигнализируют о выбросах и потенциально отравленных шагах.

Ключевая проблема на практике – порог θ , по которому принимается бинарное решение «пропустить/отсекать» обновление. Фиксированная константа (например, «0,5 по умолчанию») в реальных раундах дает два неприятных эффекта. Во-первых, при малом числе клиентов (типично $N \approx 10$) консервативный порог удаляет слишком много доброкачественных обновлений, из-за чего растет дисперсия итогового шага и модель начинает «дергаться». Во-вторых, порог пропускает согласованные атаки: их

смещения по координатам не попадают в отсекаемые хвосты и оказываются в «центре» усреднения. Решение – не держать порог константой, а подстраивать его под актуальную «чистую» статистику.

Адаптивная калибровка выглядит так. Поддерживается небольшой скользящий буфер «чистых» обновлений за W последних раундов: в него попадают только те шаги, которые прошли предыдущие фильтры и не ухудшили валидационную метрику (AUC/PR) больше согласованного ϵ . По баллам $S(x)$ внутри буфера вычисляется верхняя квантиль q (на практике $q = 0,90 \pm 0,03$), и соответствующее значение берется как текущий порог θ . Чтобы порог не «скакал» из-за случайных всплесков, его изменение ограничивается малыми приращениями, например $|\Delta\theta| \leq 0,02$ за раунд, и удерживается в диапазоне $\theta \in [0,60; 0,95]$. Интуитивно это означает: мы «пришиваем» порог к реальному поведению доброкачественных клиентов, удерживая долю ложных срабатываний примерно на уровне $1 - q$, а все, что уходит в «хвост», считаем подозрительным.

После фильтрации применяется робастное агрегирование. Используем усеченное взвешенное усреднение (Weighted Trimmed Mean или WTM далее), чтобы ни один «сильный» клиент не перетянул итог. Оно вычисляется по формуле:

$$\hat{g} = \text{Trimmed Mean}(\{w_k g_k : S(g_k) \leq \theta\}, \tau), \quad w_k = \frac{e^{-\beta l_k}}{\sum_j e^{-\beta l_k}},$$

где τ – доля усечения по координатам (типично $0,1 - 0,2$ при $N \approx 10$), l_k – локальная функция потерь на стороне клиента, β – «температура» взвешивания (на практике $1-3$, в зависимости от шкалы l_k). Усечение убирает крайние координатные значения среди допущенных обновлений, а веса уменьшают вклад клиентов с более высоким локальным лоссом, что стабилизирует направление шага.

Эмпирическая проверка проводилась на синтетическом наборе транзакций PaySim1 [6], где моделировались атаки типа label-flip [7] и feature-shift, в том числе с возмущением признаков $\delta \sim N(0,5; 0,1^2)$. Конфигурация раунда: десять клиентов ($N = 10$), по

пять локальных шагов у каждого, доля атакующих $\alpha \in \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$. Без фильтрации и с одной лишь конфиденциальной агрегацией (SMPC) наблюдался ускоренный рост смещения: для $\alpha = 0,3$ L2-отклонение итогового шага доходило до 0,457 (при простом усреднении 0,302), а косинусное сходство падало до 0,238 (против 0,738 при простом усреднении). При $\alpha = 0,4$ смещение для SMPC достигало ~0,65, что эквивалентно существенной деградации ориентации шага оптимизации (рис.1).

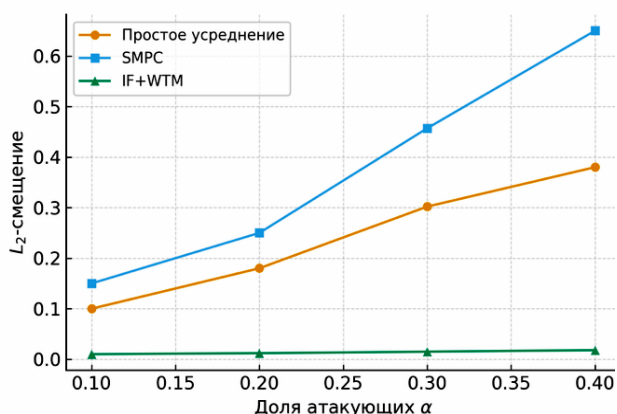


Рис. 1. L2-смещение итогового шага при различных долях атакующих клиентов α

Внедрение описанной связки IF с адаптивным порогом и усеченного взвешенного усреднения радикально изменяет картину: L2-смещение удерживается ниже 0,02 даже при $\alpha = 0,4$, а косинусное сходство остается выше 0,9998 на всем диапазоне α . Это означает, что итоговая траектория почти совпадает с эталонной, как если бы обучение шло на «чистых» данных (рис. 2).

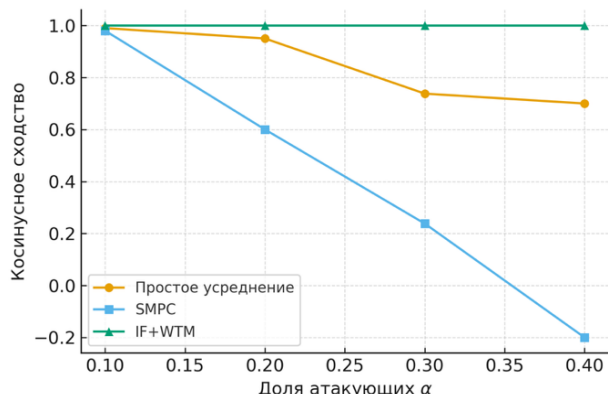


Рис. 2. Косинусное сходство итогового шага с эталонным направлением при различных долях атакующих клиентов α

Чувствительность схемы задается тремя параметрами – квантилью q в IF, долей усечения τ в агрегаторе и «температурой» взвешивания β . Порог аномальности θ мы определяем как q -квантиль распределения баллов $S(x)$ по «чистому» скользящему окну. Это автоматически фиксирует верхнюю гра-

ницу ложных отклонений честных обновлений на уровне $1 - q$. При $N = 10$ и $q = 0,90$ ожидаем не более одного честного клиента, ошибочно отфильтрованного в раунде; при $q = 0,95$ – не более половины клиента в среднем (т.е. один в двух раундах). Увеличение q снижает вероятность пропуска атаки, но уменьшает мощность выборки для усреднения. В наших опытах оптимальный компромисс достигается в интервале $q \in [0,88; 0,93]$; значение ниже 0,88 заметно повышает риск пропуска «приграничных» атак, выше 0,93 – чаще «режет» честные обновления при малом N .

Доля усечения τ задает число отбрасываемых экстремумов по координате. При N_{acc} принятых после детектора клиентах реальное число отсечений равно $r = \lfloor \tau N_{acc} \rfloor$ с каждой стороны. Для типичного $N_{acc} = 8-9$ и $\tau = 0,20$ имеем $r = 1$ (иногда $r = 2$), т.е. на каждую координату удаляется по одному минимуму и максимуму. Это достаточно, чтобы «снять» оставшиеся хвосты, но не настолько агрессивно, чтобы разрушить центральную часть распределения. Практически $\tau \in [0,10; 0,20]$ при $N \approx 10$ дает устойчивую работу; при $\tau < 0,10$ усечение часто не компенсирует остаточные смещения после фильтра, при $\tau > 0,20$ на малом N начинает расти разброс итогового шага из-за нехватки данных.

Параметр β управляет контрастом весов.

$$w_k = \frac{e^{-\beta l_k}}{\sum_j e^{-\beta l_k}}.$$

При $\beta < 1$ распределение весов излишне «плоское» и плохо подавляет клиентов с большим локальным лоссом, при $\beta > 3$ один-два клиента могут получить непропорционально высокий вес. Эмпирически $\beta \in [1,5; 2,5]$ удерживает максимум индивидуального вклада в пределах $w_{max} \lesssim 0,25$ в типичных раундах и предотвращает доминирование единичных обновлений. Согласованная тройка параметров $(q, \tau, \beta) = (0,90; 0,20; 2,0)$ обеспечивает в конфигурации $N = 10$, $\alpha \in \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$ фильтрацию не менее одной «крайней» точки по координате и ограничивает ожидаемое число ложных отклонений честных клиентов на уровне ≤ 1 за раунд при заметном снижении пропуска атакующих после детектора.

С вычислительной точки зрения схема параметризуется прозрачно. IF с T деревьями и обучающей выборкой размера n работает за $O(T \log n)$; при $T = 100$ и $n \leq 10^3$ на компактных проекциях обновлений (например, после PCA до 10–20 компонент) это укладывается в бюджет одного федеративного раунда. Буфер калибровки хранит только скалярные $S(x)$ и служебные флаги, что соответствует принципу минимизации данных. При жестких требованиях приватности вычисление $S(x)$ переносится на сторону клиента, а сервер получает только агрегированные квантили для обновления θ , это не меняет описанные диапазоны q , τ и β .

Можно сделать вывод, что при использовании связки «адаптивный порог IF + усеченное взвешен-

ное усреднение» с параметрами из указанных диапазонов достигаются стабильные численные показатели: L2-смещение итогового шага меньше чем на 0,02 при доле атакующих до 40% и косинусное сходство больше, чем 0,9998 на всем диапазоне α . Эти цифры получены в сценарии PaySim1 с комбинированной атакой label-flip + feature-shift и $N = 10$. Схема явно фиксирует допустимый уровень ложных отклонений честных клиентов $(1 - q)$, гарантирует не менее одного отсека экстремумов по координате при $\tau \approx 0,20$ и исключает доминирование отдельных клиентов за счет $\beta \in [1,5; 2,5]$. Именно такая конкретика и нужна для воспроизводимого предотвращения атак отравления данных в федеративном обучении.

Литература

1. Wu J. Challenges and Countermeasures of Federated Learning Data Poisoning Attack Situation Prediction / J. Wu, J. Jin, C. Wu // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 6. – P. 901. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12060901> (дата обращения: 25.09.2025).
2. Federated Learning: A Comparative Study of Defenses Against Poisoning Attacks / I. Carvalho, K. Huff, L. Gruenwald, J. Bernardino // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 22. – P. 10706. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210706> (дата обращения: 25.09.2025).
3. A Verifiable, Privacy-Preserving, and Poisoning Attack-Resilient Federated Learning Framework / W.E. Mbonu, C. Maple, G. Epiphaniou, C. Panchev // Big Data and Cognitive Computing. – 2025. – Vol. 9, No. 4. – P. 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc9040085> (дата обращения: 25.09.2025).
4. Gu Z. ANODYNE: Mitigating backdoor attacks in federated learning / Z. Gu, J. Shi, Y. Yang // Expert Systems with Applications. – 2025. – Vol. 259. – Article 125359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125359> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Low Dimensional Secure Federated Learning Framework Against Poisoning Attacks / E.S. Erdol, B. Gençtürk, H. Erdol, G. Ulutas // Future Generation Computer Systems. – 2024. – Vol. 158, No. 13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.04.017> (дата обращения: 25.09.2025).
6. Synthetic Financial Datasets for Fraud Detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/ealaxi/paysim1> (дата обращения: 25.09.2025).
7. LFighter: Defending against the label-flipping attack in federated learning / N.M. Jebreel, J. Domingo-Ferrer, D. Sánchez, A. Blanco-Justicia // Neural Networks. – 2024. – Vol. 170. – P. 111–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2023.11.019> (дата обращения: 25.09.2025).

Олифиренко Артем Алексеевич

Специалист по защите данных, отв. за безопасность ИИ-систем ООО «Экосистема недвижимости «Метр квадратный» (ВТБ-группа), магистрант каф. информационной безопасности автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Саратовский гос. технический ун-т им. Ю.А. Гагарина» (СГТУ)
Эл. почта: artemolifirenko@yandex.ru

Е.П. Орловский, А.А. Шелупанов

Графовые нейронные сети для идентификации по динамике нажатий клавиш

Рассматривается использование графовых нейронных сетей для задачи идентификации пользователя по динамике нажатий клавиш. Клавиатурный почерк представляется как граф, где каждая вершина – это событие печати, а именно сама нажатая клавиша, а ребра – это временные и пространственные связи между ними. Такие сети позволяют автоматически находить в таком графе устойчивые паттерны, необходимые для анализа.

Ключевые слова: графовые нейронные сети, клавиатурный почерк, непрерывная аутентификация.

Идентификация по клавиатурному почерку – способ распознать пользователя по тому, как он печатает, и поддерживать защиту не только в момент входа, но и во время всей сессии. Такой подход особенно важен там, где разовая проверка паролем уже не обеспечивает достаточного уровня защиты, а риски перехвата активной сессии высоки.

Основная трудность в том, что печать является нестационарным потоком событий, интенсивность которых меняется вместе с устройством, раскладкой и состоянием пользователя. Кроме того, при печати могут встречаться опечатки и правки. Ранее поток нажатий обычно разбивали на фиксированные (скользящие) окна и далее анализировали либо статистическими методами [1], либо сверточными нейронными сетями [2]. Данные методы справляются с поставленной задачей, но теряется часть структуры: какие клавиши расположены ближе друг к другу, какие пары символов встречаются чаще и как переходы между ними формируют индивидуальный ритм.

Предлагается рассматривать набор нажатий как граф, где каждое событие – это вершина с признаками, а связи показывают порядок во времени и соседство на клавиатуре. Графовые нейронные сети умеют распространять информацию по таким связям и выделять устойчивые паттерны даже при нерегулярной печати и смене раскладки. Это представление лучше согласуется с природой данных, упрощает работу в онлайне и делает решения более объяснимыми: видно, какие переходы и участки клавиатуры сильнее влияют на итоговую идентификацию.

Графовые нейронные сети

Графовые нейронные сети (GNN) – это класс моделей глубокого обучения, которые работают прямо с графами: структурой данных, которая моделирует набор объектов (узлов) и их взаимосвязи (ребра) [3]. Модель многократно обновляет представление каждой вершины, собирая информацию от её соседей по рёбрам. После нескольких таких шагов получаются векторы-представления для вершин, рёбер или всего графа и возможно решать задачи классификации, поиска похожести или предсказания связей. В отличие от обычных свёрточных или рекуррентных сетей, GNN не требуют ровной сетки или строгой последовательности – они учитывают произвольную структуру связей, а значит, подходят для данных, где важны отношения между элементами.

Процесс печати можно представить как граф $G = (V, E)$, где каждая вершина $v \in V$ соответствует клавише на клавиатуре, а каждое направленное ребро $(u, v) \in E$ отражает переход от клавиши u к клавише v в реальном потоке нажатий. Граф удобно формировать в скользящем окне по последним N нажатиям или по интервалу длительностью T . При появлении перехода добавляется ребро и обновляются его характеристики. У вершин заданы признаки h_v – среднее и разброс времени удержания конкретной клавиши, частота использования в окне. У рёбер заданы признаки e_{uv} – интервал между отпусканьем u и нажатием v , число наблюдений такого перехода.

Например, приставим слово «сессия» как ориентированный граф переходов между клавишами. Множество вершин $V = \{с, е, и, я\}$ и множество рёбер (переходов) между последовательными символами $E = \{(с, е), (е, с), (с, с), (с, и), (и, я)\}$. Визуальное представление графа изображено на рис. 1.

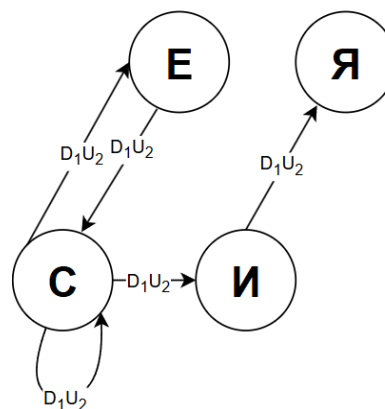


Рис. 1. Граф переходов между клавишами

Графовая нейросеть обрабатывает такой объект напрямую. На каждом шаге печати пользователем представление вершины обновляется с учётом соседей и признаков рёбер. Благодаря этому фиксируются типичные маршруты по клавиатуре, различия темпа для близких и дальних клавиш и общий рисунок набора.

После нескольких итераций извлекается векторное представление всего графа – глобальный эмбединг, который служит компактной подписью текущего окна печати. Для идентификации этот вектор сравнивается с персональным прототипом пользова-

теля, вычисляется мера сходства и принимается решение; в непрерывном режиме оценки обновляются по мере поступления новых событий и сглаживаются во времени для повышения устойчивости.

Такое представление естественно переносит паузы, рывки скорости и смену раскладки, поскольку информация хранится на вершинах и рёбрах, а не в жёстко заданной временной сетке. В итоге GNN опирается на устойчивые, трудноподделываемые зависимости между переходами, что повышает надёжность идентификации в реальных сценариях печати.

Графовый подход хорошо подходит для анализа клавиатурного почерка по нескольким причинам. Во-первых, процесс печати пользователем – это не просто последовательность во времени, а сеть связей, важны не только интервалы между нажатиями, но и частые пары символов. Всё это удобно описывается рёбрами и их признаками. Во-вторых, поток нажатий неровный: бывают паузы, ускорения, смена раскладок и вставки текста. Их трудно уложить в ровную сетку, тогда как GNN нормально работают с такими данными без грубых преобразований.

Воспользуемся данными из открытого набора KeyRecs: Keystroke Dynamics Dataset [4]. Этот набор содержит данные в секундах между нажатием (D) или отпусканием (U) клавиши² относительно клавиши¹. На основе этих данных каждое окно набора превращается в ориентированный граф $G = (V, E)$, где V – множество встреченных в окне клавиш, а E – переходы $u \rightarrow v$ между ними. Для вершины v фиксируются признаки h_v : среднее значение DU по всем нажатиям этой клавиши в окне и количество самих нажатий. Для ребра (u, v) фиксируются признаки e_{uv} : средние значения DD, DU_T, UD, UU по всем наблюдениям перехода $u \rightarrow v$ в окне и нормированная частота самого перехода. Повторяющиеся переходы аккумулируются усреднением по числу срабатываний. Самопереходы (например, «с»→«с» в слове «сессия») остаются допустимыми рёбрами. Для устойчивости значения разумно масштабировать робастно и, при необходимости, сглаживать во времени экспоненциальным средним, чтобы единичные «скачки» не ломали картину окна.

Требования по адаптации ориентируются на непрерывную работу на свободном тексте. Предполагается скользящее окно по последним N переходам или по последним T секундам набора, с обновлением оценки при каждом новом событии. Порог решения калибруется под целевую долю ошибок (EER/FAR/FRR) на валидации, а в онлайн используется правило с разными порогами для подтверждения и отзыва. «Своего» подтверждать чуть быстрее, а доступ отзывать только при устойчивом несоответствии, чтобы избежать дребезга на неровной печати. Персонализация не требует «тяжёлого» дообучения, так как хранится эталонный эмбединг пользователя, который мягко обновляется на окнах высокой уверенности. Для приватности и простоты развёртывания сохраняются только эмбединги и

агрегированные статистики окна, сырые события не накапливаются.

На основе исходных данных была составлена следующая архитектура. В каждом окне сырые события преобразуются конструктором графа. Формируются множества V и E , а также признаки h_v для вершин и e_{uv} для рёбер. Затем граф обрабатывается графовым энкодером – темпоральной GNN с распространением сообщений по наблюдаемым рёбрам и механизмом внимания, выделяющим более информативные переходы. Полученные представления агрегируются глобальным объединением в фиксированный эмбединг окна, который сравнивается с эталоном пользователя, после чего результат калибруется и сглаживается во времени с отдельными порогами на подтверждение и отзыв.

Такая постановка основана на доступных признаках (вершинные DU и рёберные DD, DU_T, UD, UU с их частотами), не зависит от формы клавиатуры и остаётся реализуемой на устройстве за счёт разреженных вычислений по рёбрам, которые фактически встречаются во время печати. Учёт частот переходов и усреднённых рёберных задержек захватывает индивидуальные «маршруты» печати и ритмику пользователя.

Практическая ценность подхода может проявляться в скорости и переносимости. За счёт разреженности графа ожидается, что объём вычислений будет в основном зависеть от числа переходов в окне, а не от длины плотной последовательности, что потенциально снижает задержку на устройстве. Модель с несколькими типами связей должна лучше переноситься между раскладками и устройствами, поскольку геометрические и временные отношения остаются сопоставимыми даже при смене символов. Это может уменьшить объём персонализации и повысить устойчивость на свободном тексте. В сценариях открытой верификации графовые эмбединги, обученные контрастно или на прототипах, могут обеспечивать достаточную разделимость пользователей при умеренном объёме данных на человека.

Заключение

В итоге графовые нейронные сети дают естественный способ описать клавиатурный почерк пользователя как систему связей, а не просто как ряд измерений во времени. Такое представление облегчает работу в онлайн, сохраняет важные отношения между клавишами, делает решения более объяснимыми и повышает устойчивость к реальным помехам. В совокупности эти свойства делают графовые нейронные сети не просто очередной альтернативой известным CNN/RNN-подходам, а содержательной сменой представления, приближающей модель к реальной структуре поведения. Именно поэтому исследование GNN для идентификации по динамике нажатий представляется перспективным направлением, способным улучшить баланс между точностью, скоростью реакции и устойчивостью в условиях длительных сессий, разнообразия устройств и естественного свободного текста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015)э

Литература

1. Кочегурова Е.А. Особенности непрерывной идентификации пользователей на основе свободных текстов в режиме скрытого мониторинга / Е.А. Кочегуров, Ю.А. Мартынова // Программирование. – 2020. – № 1. – С. 15–28.
2. Altwaijry N. Keystroke Dynamics Analysis for User Authentication Using a Deep Learning Approach // International Journal of Computer Science and Network Security. – 2020. – Vol. 20, No. 12. – P. 209–216.
3. Graph neural networks: A review of methods and applications / J. Zhou, G. Cui, S. Hu, Z. Zhang, C. Yang, Z. Liu, L. Wang, C. Li, M. Sun // AI Open. – 2020. – No. 1. – P. 57–81.

4. KeyRecs: A keystroke dynamic and typing pattern recognition dataset / T. Dias, J. Vitorino, E. Maia, O. Sousa, I. Praça // Data in Brief. – 2023. – Vol. 50. – P. 8.

Орловский Евгений Павлович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: orlovskiiizhenya@gmail.com

Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, проф., президент ТУСУРа, зав. каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: president@tusur.ru

И.В. Трусов, В.Г. Крючков, С.Е. Малиновский, С.А. Пашкевич

Исследование и проектирование систем валидации генераторов сетевого трафика и оборудования

Исследуется проблема технологической зависимости от зарубежных решений для тестирования сетевой инфраструктуры. Цель работы – разработка научно обоснованной методики оценки характеристик генераторов сетевого трафика. На основе сравнительного анализа существующих аналогов предложена оригинальная архитектура трехуровневых тестовых стендов. Разработан и апробирован комплекс исследовательских методик, включающий измерения пропускной способности, задержек и устойчивости к нагрузке в соответствии с международными стандартами. Основным результатом является методология, позволяющая проводить комплексную верификацию как коммерческих, так и разрабатываемых отечественных решений, что подтверждает её практическую значимость для обеспечения технологического суверенитета.

Ключевые слова: генератор сетевого трафика, исследование методик тестирования, верификация, тестовые стенды, сетевое оборудование, RFC 2544.

Современная сетевая инфраструктура требует тщательного тестирования и анализа для обеспечения надёжности, производительности и безопасности [1]. Ключевым инструментом для решения этих задач являются генераторы сетевого трафика. В настоящее время рынок данных решений практически полностью занят дорогостоящими проприетарными продуктами зарубежных компаний, таких как Keysight IXIA, что создаёт существенную технологическую и финансовую зависимость для операторов связи и компаний в сфере информационной безопасности в РФ и странах СНГ [2]. Отсутствие доступных отечественных полнофункциональных аналогов усугубляет данную проблему.

Обзор существующих решений и функциональные требования

Проведенный анализ рынка позволил разделить генераторы сетевого трафика на две основные категории: программные и программно-аппаратные решения [4, 5].

К программным решениям относятся такие инструменты с открытым исходным кодом, как iPerf3 (тестирование пропускной способности TCP/UDP), Scapy (конструктор произвольных пакетов), Ostinato [8] (GUI-генератор трафика), Apache JMeter [9] и Gatling [10] (нагрузочное тестирование веб-приложений). Их преимуществами являются доступность и гибкость, а ключевыми недостатками – ограниченная производительность и ориентация на узкий круг задач.

Программно-аппаратные решения, такие как Cisco T-Rex (на базе DPDK), MoonGen [12] и коммерческий комплекс Keysight IXIA, обеспечивают высокоскоростную генерацию трафика (до сотен Гбит/с), поддержку сложных сценариев и протоколов L2-L7 модели OSI, а также высокую точность измерений. Однако они требуют специализированного оборудования, обладают высокой стоимостью и сложностью в освоении [4].

На основе проведенного анализа были сформулированы функциональные требования к разрабатываемому генератору [5, 14]:

– Генерация трафика различных протоколов (Ethernet, IP, TCP/UDP, HTTP и др.) [7, 15].

– Точное управление скоростью передачи и размером пакетов [6, 8].

– Масштабируемость для эмуляции тысяч одновременных соединений [9, 10].

– Сбор и анализ статистики (задержки, джиттер, потери пакетов) [6, 16].

– Поддержка аппаратного ускорения (на базе DPDK) [11, 12].

– Интеграция в CI/CD-процессы и системы визуализации (например, Grafana) [9, 10].

Проектирование тестовых стендов

Для разработки и испытаний прототипа генератора были спроектированы три типа тестовых стендов: аппаратный, программный и программно-аппаратный [17].

Аппаратный стенд предназначен для высокоточного тестирования физического оборудования в условиях, приближенных к реальным. Его основу составляют генератор трафика IXIA (с поддержкой DPDK), коммутатор Cisco Nexus с портами 10 Гбит/с и аппаратный анализатор трафика VIAVI Solutions. Стенд позволяет проводить сертификационные тесты по стандартам RFC 2544 [18] и Y.1564 [19] на скоростях до 100 Гбит/с. На рис. 1 представлена схема работы аппаратного стенда.

Программный стенд предполагает развёртывание в виртуальной среде EVE-NG и включает виртуальные маршрутизаторы (Cisco IOL), генератор трафика на базе ПО IXIA, анализаторы Wireshark [16] и Tereplay, а также средства нагрузочного тестирования Apache JMeter. Данный стенд используется для отладки базовой функциональности, симуляции сетевых сценариев и первоначальной проверки корректности работы алгоритмов. На рис. 2 представлена схема работы программного стенда.

Программно-аппаратный стенд является гибридным и сочетает элементы двух предыдущих. Он включает физические компоненты (сервер с IXIA, коммутатор Cisco Nexus) и виртуальную среду EVE-NG. Такой подход позволяет проводить комплексное тестирование как на физическом, так и на виртуаль-

ном оборудовании, оценивая производительность и устойчивость системы под комбинированной

нагрузкой [17]. На рис. 3 представлена схема работы программно-аппаратного стенда.

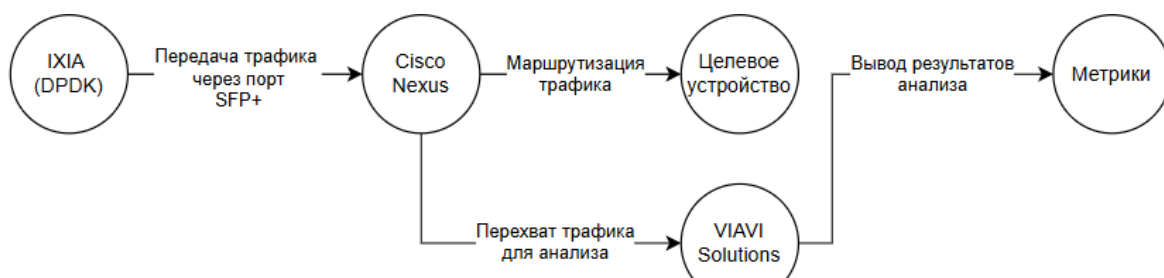


Рис. 1. Схема работы аппаратного стенда

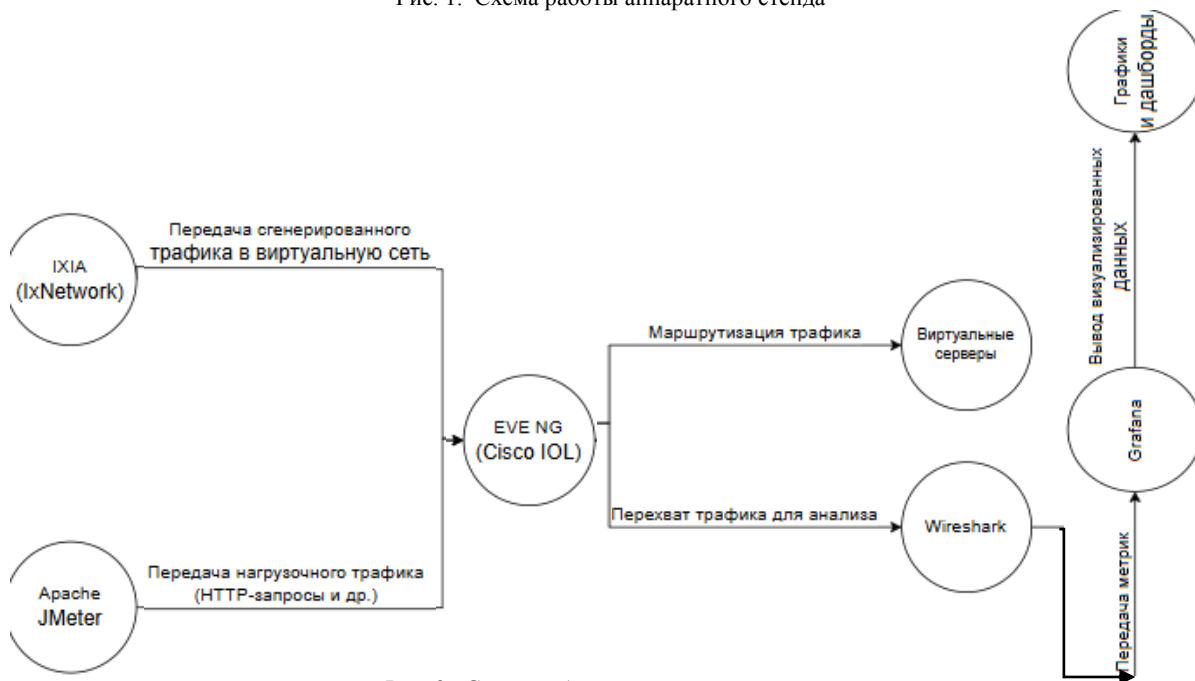


Рис. 2. Схема работы программного стенда

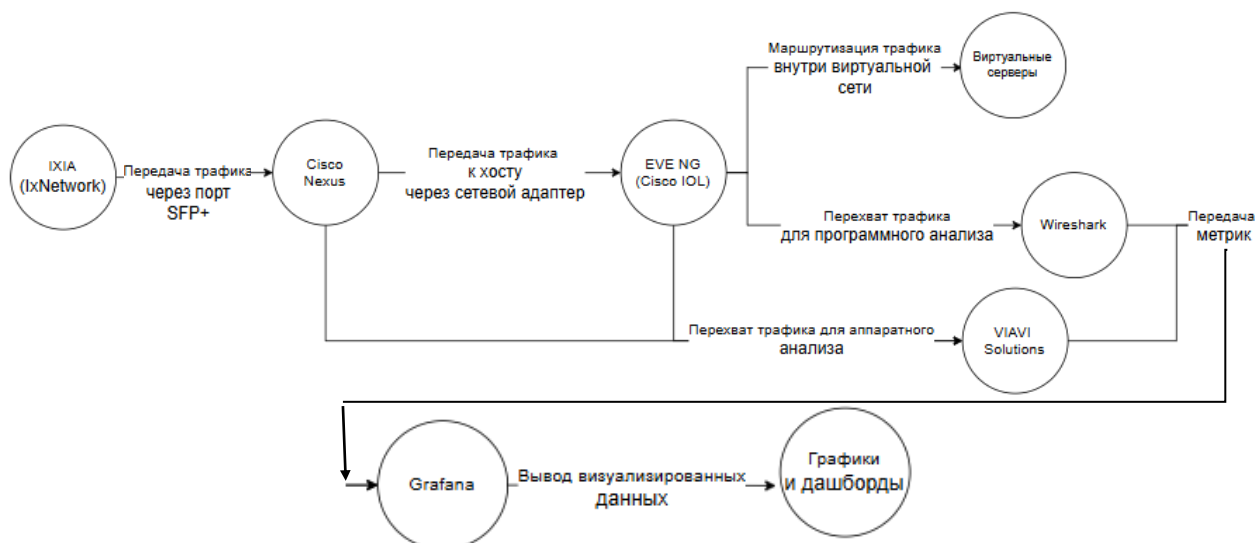


Рис. 3. Схема работы программно-аппаратного стенда

Комплексный подход к тестированию генераторов сетевого трафика

Для всесторонней оценки характеристик сетевых устройств разработан комплекс методик тестирования. Основные из них включают:

1. Тестирование пропускной способности (Throughput): определение максимальной скорости передачи данных без потерь пакетов. Тест проводится с постепенным увеличением нагрузки до момента возникновения потерь [18].

2. Тестирование задержки (Latency) и джиттера (Jitter) [6, 16]: измерение времени прохождения пакета через устройство (RTT или One-Way Delay) и вариаций этого времени. Для точных измерений требуется синхронизация времени (PTP, GPS).

3. Тестирование потерь пакетов (Packet Loss) [6]: оценка доли потерянных пакетов при различных уровнях нагрузки (25, 50, 75, 100% от пропускной способности канала).

4. Стресс-тестирование (Stress/Soak Test) [9, 20]: проверка стабильности работы устройства в условиях длительной (несколько часов или суток) интенсивной нагрузки с мониторингом потребления ресурсов (CPU, RAM) и появления сбоев.

5. Функциональное тестирование [7, 15]: проверка корректности работы сетевых функций, таких как NAT, межсетевой экран, QoS, маршрутизация и обработка VLAN.

6. Тестирование на устойчивость к аномалиям (Negative Testing) [7, 21]: воздействие на устройство некорректным или вредоносным трафиком для оценки его отказоустойчивости.

Каждая методика реализуется на соответствующем типе стенда, что позволяет получать достоверные и воспроизводимые результаты на всех этапах разработки.

Заключение

В ходе проведенной работы был выполнен комплексный анализ рынка генераторов сетевого трафика, выявлены ключевые преимущества и недостатки существующих коммерческих и открытых решений. На основе этого анализа сформулированы функциональные требования к разрабатываемому отечественному генератору.

Для его создания и испытаний были спроектированы три типа тестовых стендов (аппаратный, программный и программно-аппаратный), каждый из которых предназначен для решения специфических задач на разных этапах разработки. Разработан и систематизирован комплекс методик тестирования, позволяющих всесторонне оценивать производительность, надежность и функциональность сетевых устройств.

Проведенная работа закладывает основу для создания конкурентоспособного открытого решения, способного снизить зависимость от импортного оборудования в области тестирования сетевой инфраструктуры.

Литература

1. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2018. – 512 с. [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – URL: <https://iperf.fr/iperf-doc.php> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Шелупанов А.А. Импортзамещение в сфере информационной безопасности: проблемы и перспективы // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6. – С. 45–52.
3. Ixia Fabric Controller Clustering: data sheet // Keysight Technologies. – 2023. – 28 p.
4. Cao J. et al. A Survey of Network Traffic Generation // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Vol. 22, No. 4. – P. 2845–2884.

5. Alenezi M. Security Risks in the Software Development Lifecycle // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2019. – Vol. 8, No. 3. – P. 7048–7055.

6. iPerf: The ultimate guide to network performance testing [Электронный ресурс]. – URL: <https://iperf.fr/iperf-docs.php> (дата обращения: 20.02.2025).

7. Scapy: powerful interactive packet manipulation program [Электронный ресурс]. – URL: <https://scapy.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 20.02.2025).

8. Ostinato: Packet Crafter and Traffic Generator [Электронный ресурс]. – URL: <https://ostinato.org> (дата обращения: 20.02.2025).

9. Apache JMeter: User's Manual [Электронный ресурс]. – URL: <https://jmeter.apache.org/usermanual/index.html> (дата обращения: 21.02.2025).

10. Gatling: Load Testing as Code [Электронный ресурс]. – URL: <https://gatling.io/docs/gatling/> (дата обращения: 21.02.2025).

11. Cisco TRex Traffic Generator: official documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://trex-tgn.cisco.com/trex/doc/> (дата обращения: 20.02.2025).

12. MoonGen: A Scriptable High-Speed Packet Generator [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/emmericp/MoonGen> (дата обращения: 21.02.2025).

13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1: Основная модель.

14. Конев А.А. Методология проектирования систем защиты информации распределенных объектов. – Томск: ТУСУР, 2022. – 168 с.

15. RFC 793: Transmission Control Protocol // IETF. – 1981. – 91 p.

16. The Wireshark® User's Guide [Электронный ресурс]. – URL: https://www.wireshark.org/docs/wsug_html/ (дата обращения: 21.02.2025).

17. Носач В.В. Методы и средства тестирования сетевого оборудования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 5. – С. 34–42.

18. RFC 2544: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices // IETF. – 1999. – 31 p.

19. ITU-T Y.1564: Ethernet service activation test methodology // International Telecommunication Union. – 2016. – 60 p.

20. Браудер Д. Нагрузочное тестирование. Практическое руководство. – СПб.: Питер, 2020. – 304 с.

21. Shelupanov A. Threat Model for IoT Systems on the Example of OpenUNB Protocol // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2019. – Vol. 7, No. 9. – P. 283–290.

Трусов Иван Владимирович

Студент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Эл. почта: ewan31tr@gmail.com

Крючков Виталий Геннадьевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: vitaly.kryuchkov.q@gmail.com

Малиновский Станислав Евгеньевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: stas.malinovskiy.05@mail.ru

Пашкевич Станислав Александрович

Преподаватель каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: psa@fb.tusur.ru

К.Г. Пономарёв, Е.А. Верещагина

Применение метрики Вассерштейна в генеративно-сопоставительных сетях для повышения качества выявления голосовых дипфейков

Метрика Вассерштейна – эффективный инструмент защиты от режима коллапса в генеративно-сопоставительной сети GAN, позволяющая проводить генерацию новых изображений и избегать повторения одинаковых образцов. В отличие от функции потерь, оценивающей качество моделирования конкретных значений, расстояние Вассерштейна позволяет сравнивать распределение вероятностей. Кроме того, в отличие от перекрестной энтропии расстояние Вассерштейна измеряет дистанцию между истинными и поддельными данными. Генератор GAN использует разные режимы данных, благодаря которым избегается режим коллапса. Процесс обучения улучшается путем замены логического регрессора на линейную функцию, что позволяет дискриминатору выступать в качестве критика и измерять расстояния между двумя распределениями. Функционал дискриминатора критика оценивает уровень сходства двух распределений. Таким образом, на выходе значения для реальных примеров уменьшаются, а для фейковых – увеличиваются, что позволяет обеспечить максимальную разницу между ними. Для генеративно-сопоставительной сети характерен феномен затухания градиентов, когда значения генератора становятся близкими к нулю, а дискриминатор выдает однозначные прогнозы. Изменение меры потерь в качестве расстояния Вассерштейна позволяет снизить появление затухания градиентов. Следовательно, использование метрики Вассерштейна может улучшить решение класса задач по распознаванию голосовых дипфейков на спектральных тепловых картах мел-кэпстральных коэффициентов аудиопотока.

Ключевые слова: расстояние Вассерштейна, генеративно-сопоставительные нейронные сети, синтетическая речь, затухание градиентов, режим коллапса, голосовые дипфейки, спектрограммы.

Задача выявления голосовых дипфейков не является тривиальной и использует комплексный подход с применением главного инструмента – искусственной нейронной сети. Любой аудиосигнал возможно представить в формате спектрограммы мел-кэпстральных коэффициентов и провести процедуру выявления синтетической речи. Любые изменения спектрограммы путем применения технологий компьютерного зрения и машинного обучения возможны при обработке изображений в искусственной нейронной сети. Наиболее эффективным инструментом для предварительного обучения на массиве изображений является генеративно-сопоставительная нейронная сеть GAN, где генератор и дискриминатор ведут процедуру обучения, а также соперничают между собой в имитации распределения данных.

В классическом подходе работы с GAN метрикой оценки является функция потерь, которая количественно проводит оценку, насколько прогноз модели отклоняется от фактических значений. Математически функция потерь представлена в (1):

$$L(y, \hat{y}) = f(y - \hat{y}), \quad (1)$$

где L – функция потерь; y – фактическое (истинное) значение; $\hat{y}$ – предсказанное моделью значение; f – конкретная реализация функции потерь.

Оптимизация модели GAN зависит от минимизации функции потерь. Расстояние Вассерштейна, напротив, измеряет сходство между двумя распределениями вероятностей и проводит анализ схожести данных, в том числе обеспечивает последовательные и значительные градиенты на протяжении всего процесса обучения.

Ранее проведен эксперимент по использованию другой модели нейронной сети – сверточной

нейронной сети CNN. Операция свёртки основана на взаимодействии небольшого набора весов (фильтра или ядра) с областью изображения, называемой оконной функцией. Когда ядро проходит по каждому участку изображения, оно применяет взвешенное усреднение, выделяя значимые особенности изображения. Процесс выглядит следующим образом:

- выбор ядра (матрицы малых размеров);
- перемещение окна фильтра по изображению;
- выполнение поэлементного умножения и суммирования, результатом которого становится элемент нового массива карты признаков.

Результатом свёртки является новая карта признаков, отражающая наличие характерных деталей на изображении, таких как контуры, углы или текстуры. Созданная модель CNN использовала для процесса обучения публичную выборку библиотеки «Kaggle» реальной и фейковой голосовой речи путем применения функции потерь кроссэнтропии в связке с функцией активации Softmax. Теоретическая точность данной модели составила 78% при 90 итерациях [1].

Для повышения точности выявления голосовых дипфейков возможен новый подход путем применения метрики Вассерштейна и модели GAN [2]. Расстояние Вассерштейна между двумя вероятностными мерами μ_1 и μ_2 представлено в (2):

$$W_p(\mu_1, \mu_2) = \left(\int_0^1 |F_1^{-1}(q) - F_2^{-1}(q)|^p dq \right)^{1/p}, \quad (2)$$

где μ_1 , μ_2 , P_p – вероятностные меры, F_1^{-1} , F_2^{-1} – квантильные функции.

Дискриминатор выполняет не только роль критика, но и оценщика. Дает конкретное значение к выполнению необходимых трудозатрат на переход одной выборки в другую. Кроме того, используется

градиентный штраф, заменяющий ограничение веса в случае повторной генерации одних и тех же изображений в модели GAN. Штраф за градиент не только способствует стабилизации этапа обучения, но и повышает качество создаваемых изображений, делая модель GAN более устойчивой системой для задач, связанных с синтезом изображений [3].

Важно отметить, что к дискриминатору применяются ограничения Липшица, достигаемые путём ограничения весов нейронной сети критика фиксированным диапазоном после каждой итерации. Такие ограничения гарантируют, что дискриминатор работает в пространстве функций первого порядка Липшица, что необходимо для корректного обновления расстояния Вассерштейна после каждой итерации. После обновления критика генератор обучается улучшать свои выходные данные на основе диапазона обратной связи от дискриминатора.

В модели GAN с метрикой Вассерштейна дискриминатор обучается чаще, чем генератор. Это позволяет приблизиться к оптимальному результату, обеспечивая более точную оценку. Нейронные сети с обучаемыми линейными сплайнами Липшица более выразительны. Альтернатива ограничения весов – штрафовать за норму градиента критика по отношению к его входным данным. Высокое качество генерации достигнуто на публичных обучающих наборах данных CIFAR-10 и LSUN bedrooms [4].

Распространённой проблемой при проведении анализа реальных данных является выявление различий между выборками в сложных многомерных данных при недостатке меток или аннотаций. Существует проблема обнаружения аномалий без контроля со стороны человека, также известная как обнаружение новизны. Аномальные точки, которые с низкой вероятностью могут появиться в данных, сгенерированных на основе номинального распределения, скорее всего, были сгенерированы в результате какого-то другого (аномального) процесса. Такая формулировка предполагает решение на основе оценки плотности. В многомерных наборах данных прямая оценка плотности распределения сталкивается с хорошо известным феноменом размерности, требующим экспоненциального роста размера выборки в зависимости от размерности.

Ограничения Липшица требуют, чтобы функция $f(x)$ удовлетворяла следующему условию (3):

$$|f(x_1) - f(x_2)| \leq |x_1 - x_2| \quad (3)$$

для любых x_1 и x_2 во входном пространстве. Градиент $f(x)$ по отношению к x должен иметь норму, меньшую или равную 1. Штрафной коэффициент градиента предназначен для обеспечения выполнения этого условия путём наложения штрафа на модель за градиенты с нормой больше 1 [5].

Нейронная сеть с ограничениями Липшица, оптимизированная для различения двух распределений, имеет удобную формулировку в терминах расстояния Вассерштейна и двойственности Канторовича–Рубинштейна [6]. Нейронные сети представляют собой сложные нелинейные отображения

входных данных в пространство признаков. Чтобы гарантировать устойчивость модели к небольшим изменениям входных данных, например, к шумовым искажениям изображений, желательно ограничить максимальную степень, с которой выход нейронной сети изменяется при изменении входа. Именно для этого вводится понятие липшицевой постоянной.

Дифференцируемая функция является 1-липшицевой, когда норма градиента везде не превышает 1. Существует возможность прямого ограничения нормы градиента выходного сигнала дискриминатора по отношению к его входному сигналу.

Штраф за градиент налагается на величину градиента дискриминатора относительно его входных данных. Таким образом, величина градиента будет всегда близка к единице. Штрафное значение градиента вычисляется с помощью параметра интерполяции между реальными и сгенерированными данными. Значения варьируют от 0 (все сгенерированные данные) до 1 (все реальные данные) [7].

В исследовательской работе с новым подходом в реализации GAN с метрикой Вассерштейна 60 000 цветных изображений и 70 000 серых изображений с размером 32×32 пикселя из публичных библиотек MNIST и CIFAR. На 20-й итерации новый подход показал успешную генерацию изображений без искажений и размытых границ. Фактически процесс обучения с метрикой Вассерштейна проходило быстрее, в отличие от классической архитектуры GAN [8].

Штраф за градиент не только повысил стабильность обучения, но и ускорил сходимость, подтвердив своё превосходство в задачах генерации изображений. Данный метод доказывает свою эффективность в более широком применении в генеративных задачах, где качество изображения и эффективность обучения имеют решающее значение. Отметим высокую теоретическую вероятность выявления фейковых изображений в 98% [8].

Следовательно, представленный эксперимент работы с изображениями может быть использован в выявлении изменений спектральных тепловых карт мел-кэпстральных коэффициентов аудиопотока, а внедрение метрики Вассерштейна существенно улучшить проведение экспериментов по выявлению голосовых дипфейков путем применения нейронных сетей.

Литература

1. Пономарёв К.Г. Применение сверточных нейронных сетей и алгоритмов глубокого обучения для прогнозирования и идентификации голосовых дипфейков / К.Г. Пономарёв, Е.А. Верещагина // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]. – URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2025/9859> (дата обращения: 25.09.2025).
2. Arjovsky M. Courant Institute of Mathematical Sciences / M. Arjovsky, S. Chintala, L. Bottou [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1701.07875> (дата обращения: 25.09.2025).
3. Improved Training of Wasserstein GANs / A. Courville, I. Gulrajani, F. Ahmed, M. Arjovsky, V. Dumoulin

[Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1704.00028> (дата обращения: 25.09.2025).

4. Chen D. GS-WGAN: A Gradient-Sanitized Approach for Learning Differentially Private Generators / D. Chen, T. Orekondy, M. Fritz [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1704.00028> (дата обращения: 25.09.2025).

5. Milne T. Wasserstein GANs with Gradient Penalty Compute Congested Transport / T. Milne, A. Nachman [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2109.00528> (дата обращения: 25.09.2025).

6. Ханин Л.Г. Двойственность Л.В. Канторовича – Г.Ш. Рубинштейна для пространств Липшица, определяемых разностями произвольного порядка [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathnet.ru/links/dd27351bf2175546ce8a87a0b595cfb3/dan6500.pdf> (дата обращения: 25.09.2025).

7. Rail surface defect data enhancement method based on improved ACGAN / He Zhendong, Gao Xiangyang, Gao Xiangyang, Liu Zhiyuan, Liu Zhiyuan, An Xiaoyu [Электронный ресурс]. – URL: <https://translated.turbopages.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2024.1397369/full> (дата обращения: 25.09.2025).

8. Sharma P. Ensemble WGAN (EWG): Advancing Image Synthesis and Deepfake Detection with Heterogeneous Discriminator Approach / P. Sharma, Ma. Kumar, H.K. Sharma [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/378165206_Ensemble_WGAN_EWG_Advancing_Image_Synthesis_and_Deepfake_Detection_with_Heterogeneous_Discriminator_Approach (дата обращения: 25.09.2025).

Пономарёв Константин Гаврилович

Аспирант департамента программной инженерии и искусственного интеллекта
Института математики и компьютерных технологий
Дальневосточного федерального университета (ДВФУ)
Эл. почта: liker455@yandex.ru

Верещагина Елена Александровна

Канд. техн. наук, доцент департамента программной инженерии и искусственного интеллекта
Ин-та математики и компьютерных технологий ДВФУ
Эл. почта: vereschagina.ea@dvfu.ru

Е.А. Прозорова

Идентификация пользователей по термограмме лица с применением Сиамской нейронной сети

Рассмотрена попытка автоматизации идентификации пользователей по термограмме лица с помощью Сиамской нейронной сети.

Ключевые слова: распознавание, идентификация, биометрическая аутентификация, сиамские нейронные сети, тепловизор, термограммы, изображения.

В последнее время биометрическая аутентификация активно внедряется в разные области жизни. В её основе лежат сложные алгоритмы классификации, обрабатывающие информацию с биометрических сканеров. Среди таких устройств – сканеры отпечатков пальцев и радужной оболочки глаза [1, 2].

По сравнению с традиционными методами у биометрии есть ряд преимуществ. Важным плюсом является возможность сбора данных без физического контакта с устройством. Устройства для бесконтактного сканирования биометрических данных применяют в банках, аэропортах, государственных учреждениях и других местах с повышенными требованиями к безопасности [3, 4].

Сочетание биометрических технологий с искусственным интеллектом не только усиливает защиту, но и ускоряет процесс идентификации. Таким образом, биометрическая аутентификация – это значительный шаг вперед в сфере безопасности.

Идентификация пользователя по термограмме лица

В данном исследовании основное внимание уделяется биометрической аутентификации с использованием термограмм лица.

Термограмма – это тепловое изображение (рис. 1), полученное с помощью инфракрасной камеры или тепловизора, которое отображает распределение температуры на поверхности лица.



Рис. 1. Термограмма лица без обработки

Такое распределение формирует уникальную карту тепловых полей, отражающую расположение кровеносных сосудов под кожей. Поскольку эта сосудистая структура индивидуальна для каждого человека, термограммы можно считать надежным биометрическим идентификатором [5, 6].

Точность распознавания во многом зависит от характеристик тепловизора: устройство должно обладать высокой термочувствительностью, чтобы четко фиксировать даже незначительные температурные колебания [7].

Кроме того, важную роль играет способ записи данных – видео или статичные изображения, а также наличие на термограмме посторонних шумов. В рамках данной работы в качестве основного формата выбран видеопоток, так как он позволяет разбить запись на несколько тысяч отдельных кадров для последующей обработки с помощью алгоритмов искусственного интеллекта.

Кадрирование видеопотоков также можно назвать способом борьбы с переобучением. Нейронная сеть видит каждый объект (например, человека) в огромном количестве ракурсов, с разным освещением, мимикой и частичными закрытиями. Это концентрирует процесс обучения на существенных и инвариантных признаках (например, форме лица, походке), а не на конкретных пикселях.

Модель, обученная на разнообразных данных, с большей вероятностью будет корректно работать с новыми, ранее не виденными данными из реального мира.

В результате проделанной работы с помощью тепловизора UNI-T UTI260B было получено 32 видеофайла (от 32 пользователей) длительностью от 3 до 5 мин. В результате раскадровки было получено 3 720 термограмм (общее число изображений для 32 пользователей), хотя это число может быть увеличено за счёт уменьшения интервала между нарезкой кадров.

Процесс получения биометрической информации включает в себя несколько этапов: считывание, регистрацию и детальный анализ уникальных характеристик человека с применением алгоритмов машинного обучения. Благодаря этому личность пользователя можно точно идентифицировать, что делает биометрическую аутентификацию одной из самых надежных технологий.

Автоматизация процесса идентификации, применение Сиамской нейронной сети

В настоящее время нейронные сети активно применяются для решения самых разных задач, что обусловило выбор методов машинного обучения в данном исследовании. В частности, в работе используется Сиамская нейронная сеть – специальная ар-

хитектура, состоящая из двух идентичных подсетей с общими весовыми коэффициентами [8].

Широкое применение нейронных сетей связано с их способностью автоматически извлекать сложные иерархические признаки из данных (изображений, текста, звука). Однако для задач, где важно не просто классифицировать объект, а сравнить два объекта и оценить их схожесть или различие, стандартные архитектуры (например, простой классификатор) могут быть неэффективны.

Архитектура называется Сиамской именно потому, что она состоит из двух параллельных идентичных подсетей. Самое важное – они имеют одинаковые весовые коэффициенты. Это означает, что они обучаются одним и тем же способом извлекать признаки из входных данных. Если на вход подаются два изображения кошек, обе подсети будут использовать один и тот же алгоритм для распознавания ушей, усов, формы глаз и т.д.

Цель всей архитектуры – научиться так преобразовывать объекты в векторы, чтобы расстояние между векторами похожих объектов было маленьким, а между векторами разных объектов – большим.

Такой подход особенно эффективен в задачах верификации личности, когда доступны лишь ограниченные биометрические данные пользователей. Принцип работы заключается в попарной обработке изображений: на вход сети подаются два снимка, предположительно относящихся к разным классам.

Как уже упоминалось выше, алгоритм преобразует изображения в векторы признаков, после чего вычисляет степень их различия через евклидово расстояние. На основе этого показателя принимается решение о принадлежности образцов к одному классу или разным. Критерий схожести для изображений одного класса обычно находится в диапазоне от 0 до 1 – чем меньше расстояние, тем выше вероятность совпадения.

Сиамские сети особенно полезны, когда классов много, но примеров каждого класса мало (например, верификация лица конкретного человека по одной-двум фотографиям). Сеть обучается не распознавать конкретные классы, а сравнивать, что является более общей и гибкой задачей.

Таким образом, выбор сиамской нейронной сети для решения задачи идентификации пользователя по термограммам не случаен. Он указывает на то, что решаемая задача относится к классу задач сравнения пар объектов, а не простой классификации. Этот подход позволяет эффективно измерять степень схожести, что является современным и мощным методом в арсенале машинного обучения и позволяет эффективно сравнивать биометрические данные даже при небольшом объеме обучающей выборки.

Как уже упоминалось, исходный набор данных состоял из 3 720 термографических снимков. После его разделения на обучающую и тестовую части (80 и 20% соответственно) была проведена процедура обучения Сиамской нейронной сети. Модель обуча-

лась на протяжении трёхсот эпох и показала пиковую точность около 80% на тестовой выборке в таблице. Для комплексной оценки ее работы применялись метрики accuracy, precision, recall и F1-score.

Оценка качества работы модели

Итоговые показатели метрик			
Accuracy	Precision	Recall	F1-score
0,7999	0,7761	0,7899	0,7368

Заключение

При использовании архитектуры Сиамской нейронной сети наилучшие результаты показала модель, обучающаяся на наборе данных, который был сформирован из 32 раскадрированных видеопотоков, продемонстрировав наилучшее значение точности (80%).

Использование видеопотоков вместо отдельных термограмм явилось мощным методом аугментации данных. Один видеопоток автоматически предоставляет разнообразие вариаций одного и того же объекта, что позволило Сиамской нейронной сети обучиться на множестве термограмм, допустим, одного человека.

Таким образом, можно сделать вывод о достаточной степени надёжности данного метода идентификации. Экспериментально подтверждено, что предложенный метод на основе Сиамской нейронной сети, обученный на большом и разнообразном наборе данных из видеопотоков, достигает высокого уровня точности (80%), что делает его надежным и перспективным инструментом для задач идентификации.

Литература

1. Сабанов А.Г. Идентификация и аутентификация в цифровом мире / А.Г. Сабанов, А.А. Шелупанов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2022. – 356 с.
2. Брагина Е.К. Современные методы биометрической аутентификации: обзор, анализ и определение перспектив развития / Е.К. Брагина, С.С. Соколов // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та, – 2016. – Т. 2016, № 1. – С. 40–45.
3. Шаова Т.Г. Биометрические технологии – новый уровень криминалистической идентификации человека // Криминалистика – прошлое, настоящее, будущее: достижение и перспективы развития // Матер. междунар. науч.-практ. конф. – М.: Моск. академия следственного комитета Российской Федерации, 2019. – С. 639–644.
4. Seal A. Human authentication based on fusion of thermal and visible face images / A. Seal, C. Panigrahy // Multimed Tools Appl. – 2019. – Vol. 78. – P. 30373–30395.
5. Жумажанова С.С. Влияние характеристик тепловизионных систем на точность распознавания пользователя и его состояния в задачах информационной безопасности / С.С. Жумажанова, И.Д. Татаринов // Цифровизация и кибербезопасность: современная теория и практика: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Омск: Сиб. гос. автомобильно-дорожный ун-т (СибАДИ), 2021. – С. 228–232.
6. Обработка информации в системе идентификации по термограмме лица / М.Ю. Михеев, К.В. Гудков, Т.Н. Астахова, Е.Ю. Макарова // Вестник НГИЭИ (Нижегород. гос. инж.-эконом. ун-т). – 2017. – № 4 (71). – С. 7–15.

7. Thermal infrared face recognition – a biometric identification technique for robust security system / M.K. Bhowmik, K. Saha, S. Majumder, G. Majumder, A. Saha, A.N. Sarma, D. Bhattacharjee, D.K. Basu, M. Nasipur // *Reviews, Refinements and New Ideas in Face Recognition*, India, Tripura University, Jadavpur University, 2011. – P. 113–138.

8. Методы выделения локальных признаков лица на изображении при аутентификации человека по термограмме / Н.И. Белов, М.А. Ермак, Е.А. Дубинич, А.Ю. Кузнецов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 279–286.

Прозорова Елизавета Александровна

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: pea@fb.tusur.ru

М.А. Ромащенко, С.Н. Паршин, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов

Анализ данных телеметрии БПЛА с помощью нейронной сети для повышения помехоустойчивости радиоканала управления

Рассматривается способ повышения помехоустойчивости канала управления беспилотного летательного аппарата за счёт анализа данных телеметрии. Предложено использование свёрточно-рекуррентной нейронной сети для распознавания параметров качества связи и уровня сигнала, отображаемых на экране очков пилота. На основе результатов анализа данных принимается решение о необходимости переключения рабочей частоты или изменения параметров модуляции сигнала для обеспечения устойчивой связи.

Ключевые слова: БПЛА, OSD, распознавание символов, нейронная сеть.

В современном мире наблюдается широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различных типов. На текущий момент самыми распространёнными устройствами являются БПЛА мультироторного типа с видом от первого лица (FPV). Для управления БПЛА используются системы связи на базе Long Range (LoRa) модулей в диапазонах 868 и 915 МГц. Приемопередатчик используется не только для передач команд управления, но и для непрерывного обмена данными телеметрии, содержащими в себе информацию о состоянии радиоканала. Параметры качества связи (LQ), уровень сигнала (RSSI) и отношение сигнал/помеха (SNR) отображаются на пульте управления, однако из-за использования оператором дрона FPV шлема доступ к дисплею пульта затруднен. В связи с чем в видеопередатчиках предусмотрена функция On Screen Display (OSD), выводящая данные телеметрии поверх видеопотока камеры дрона. При ухудшении качества канала связи оператор видит цифровые показатели, но не всегда успевает своевременно отреагировать на их изменение и остановить полет, что повышает риск потери дрона.

В таких условиях актуальным является применение автоматизированного анализа телеметрических данных с помощью методов машинного зрения. Это позволит реализовать адаптивное управление радиоканалом БПЛА в реальном времени, повышая надёжность связи в условиях помех [1].

Считывание телеметрии напрямую из канала управления увеличивает нагрузку на контроллеры и требует изменений в прошивках. В предлагаемой схеме вычисления вынесены на наземную сторону. Дополнительный модуль получает видеопоток, извлекает показатели из OSD и не затрагивает радиоканал. Это сохраняет совместимость с серийной аппаратурой и исключает расход пропускной способности канала управления.

OSD и свойства индикации

OSD в контексте FPV-систем представляет собой программно-аппаратный модуль наложения телеметрической информации на видеопоток. Источником данных выступают приёмник и полётный контроллер. Типовой набор отображаемых параметров включает LQ, RSSI, SNR, номер канала/частоту, напряжение и потребляемый ток, время полёта.

Остальные параметры отображаются в индивидуальном порядке. В аналоговых системах наложение полезной информации на канал видео выполняет генератор символов, добавляя яркостные вставки в строки развёртки видеосигнала.

В цифровых системах OSD формируется программной композицией поверх кадрового буфера на стороне передатчика либо приёмника. Визуально OSD использует высококонтрастные монохромные символы фиксированной метрики и положения, с частотой обновления 10–30 Гц. За счёт этих свойств индикаторы OSD остаются читаемыми при воздействии помех и могут служить источником данных для алгоритмов распознавания.

Задача сводится к выделению компактной области OSD с парой значений номер канала и уровень качества и к распознаванию этой строки с получением чисел для дальнейшего анализа. Результаты распознавания приводятся к единому формату и проверяются по допустимым диапазонам, после чего используются в контуре принятия решений.

При эксплуатации БПЛА данные о состоянии радиоканала в OSD могут отображаться с различной вариативностью (шрифты, толщина штриха, микросмещения, частичная перекрываемость). Для снижения чувствительности к таким факторам необходимо применять единообразную предобработку, включающую локальное выравнивание контраста, бинаризацию и, при необходимости, инверсию полутонов. Также выполняется нормализация размеров фрагмента кадра. Эти действия выравнивают статистики входных данных и обеспечивают корректное распознавание при умеренных изменениях стиля и положения индикации.

На основе распознанных показаний предлагается осуществлять автоматическое переключение настроек передатчика, а именно частоты или вида модуляции, при достижении критического порога, что снижает вероятность потери сигнала при работе в сложной электромагнитной обстановке.

Обоснование выбора архитектуры модели и алгоритм работы

Для анализа изображений применяются разные нейросетевые решения. В задачах локализации объектов широко используется семейство свёрточных сетей You Only Look Once (YOLO) [2]. Поскольку

распознаваемая информация в OSD представляет последовательность символов, задача относится к оптическому распознаванию символов (OCR). В работе использована свёрточно-рекуррентная архитектура CRNN, которая объединяет извлечение признаков и обработку последовательностей, что соответствует поставленной задаче лучше, чем детекторные схемы уровня YOLO, ориентированные на поиск и классификацию объектов.

На рис. 1 представлен разработанный алгоритм функционирования системы.

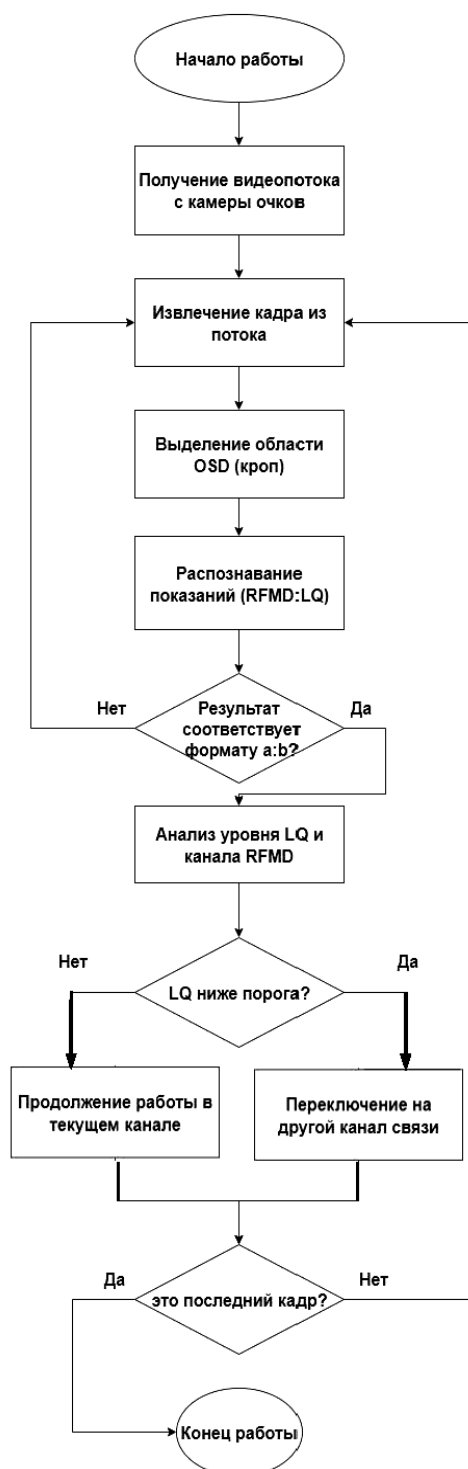


Рис. 1. Алгоритм работы системы распознавания OSD

Сначала захватывается видеопоток из видеоприёмника или FPV-очков с OSD-индикацией. Поступающий поток разбивается на отдельные кадры, после чего производится предварительная обработка. Далее выделяется область изображения, где расположены OSD-показатели канала связи.

На рис. 2 показан кадр с OSD-индикацией, где рамкой отмечена локализованная область показателя LQ (справа, внизу), по которой далее выполняются извлечение строки формата «a:b» и её распознавание.



Рис. 2. Пример кадра FPV с OSD

На этапе предобработки выполнялись стандартные операции нормализации и повышения контрастности, бинаризации и приведения фрагмента к фиксированным размерам. При необходимости применялась инверсия полутонов. Эти действия позволили минимизировать влияния помех на изображения, повысив вероятность распознавания объекта. На основе полученных фрагментов была сформирована обучающая выборка.

В ходе экспериментов было собрано и размечено порядка 2400 подобных примеров. Далее созданная база была дополнена синтетически сгенерированными изображениями, имитирующими пары числовых значений. На этом материале производилось дополнительное обучение (fine-tuning) нейронной сети [3].

После этапа тренировки система способна в режиме реального времени извлекать численные показатели качества канала из поступающего видеопотока. Если распознанные значения достигают заранее заданных критических уровней (например, снижение LQ ниже порога или резкое уменьшение RSSI), автоматически формируется решение о переключении рабочей частоты или изменении модуляции сигнала.

Для надёжной работы перестройка рабочей частоты выполняется при серии подтверждённых изменений параметров LQ и RSSI ниже пороговых значений. Разовые провалы и ошибки распознавания игнорируются, а формат и диапазоны проверяются. При нехватке валидных данных система сохраняет текущие настройки или возвращается к последней стабильной конфигурации.

Архитектура распознавания и обучение

В качестве основы распознающего модуля использована CRNN. Она включает несколько свёрточных слоёв для выделения информативных признаков из изображения, после которых следуют два рекуррентных слоя типа сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) для учёта последовательной структуры символов. Выходной слой модели использует функцию потерь коннекционистской временной классификации (CTC), позволяющую нейросети распознавать последовательности переменной длины без явной сегментации символов на изображении.

Алфавит распознавания ограничен только цифрами, двоеточием и пробелом. Такой состав соответствует формату отображения OSD-параметров «CH:LQ». Для повышения надёжности распознавания в процессе обучения к изображениям применялись операции аугментации данных, включая инверсию цветов, изменение контрастности, добавление гауссовского размытия и шумов, имитирующих помехи видеопотока. Предварительное обучение сети проведено на большом количестве синтетических данных (генерация случайных пар чисел заданного формата), после чего сеть дообучалась на наборе реальных размеченных примеров (около 2 400 ручных разметок из ~27 тыс. кадров видео).

Результаты

После этапов предобучения и дообучения модель CRNN продемонстрировала стабильное распознавание пар значений формата «номер канала и уровень качества», например, 2:95 или 1:89, при этом первое число соответствует номеру канала, а второе соответствует показателю LQ. Проверка на отложенной выборке показала, что нейросеть точно извлекает ключевые телеметрические показатели, несмотря на присутствие шумов, помех и артефактов в видеопотоке. Таким образом, разработанная система способна в реальном времени преобразовывать видеоинформацию с OSD в численные параметры, пригодные для дальнейшего анализа и принятия решений. Полученные в ходе проведения эксперимента технические показатели распознавания и производительности отображены в таблице.

Показатели распознавания и производительности

Показатель	Значение
Строгое соответствие, %	94,3
Формат и диапазоны корректны, %	99,1
Точность номера канала, %	98,7
Средняя абсолютная ошибка LQ, процентные пункты, %	0,7
Доля кадров с ошибкой по LQ не более одного процентного пункта, %	93,5
Задержка на кадр, миллисекунды	27
Скорость обработки, кадры в секунду	37

Строгое соответствие означает полное совпадение распознанной пары с эталоном. Корректность формата и диапазонов означает соответствие требуемому формату пары и допустимым диапазонам па-

раметров. Точность номера канала означает верное определение номера канала. Средняя абсолютная ошибка LQ означает среднее по кадрам абсолютное отклонение уровня качества в процентных пунктах. Доля кадров с ошибкой по LQ не более одного процентного пункта означает процент кадров с малой ошибкой. Задержка на кадр означает суммарное время локализации распознавания и постобработки одного кадра. Скорость обработки означает число обработанных кадров в секунду.

На рис. 3 представлен график основных метрик распознавания.

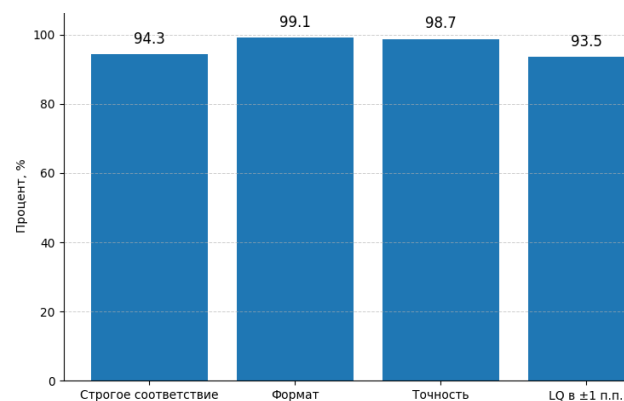


Рис. 3. Ключевые метрики распознавания на отложенной выборке

В ходе испытаний обработка выполнялась на наземной стороне на персональном компьютере. С видеоприёмника подавался аналоговый видеосигнал через устройство захвата по USB, после чего программа получала последовательность кадров и сразу передавала их в модуль распознавания без промежуточной записи. Модель выполняла распознавание в реальном времени со скоростью около 37 кадров в секунду, суммарная задержка одного кадра составляла примерно 27 миллисекунд.

Заключение

Применение нейросетевого распознавания показаний OSD открывает возможность автоматизированного мониторинга качества радиоканала управления БПЛА и адаптивной перестройки параметров радиосвязи без участия оператора. Данный подход не требует вмешательства в радиотракт и использует уже доступный видеопоток, что упрощает интеграцию в существующие комплекты аппаратуры и снижает стоимость внедрения.

Использование CRNN с контролем формата и диапазонов распознанных значений уменьшает риск ложных срабатываний и снижает нагрузку на оператора в условиях сложной электромагнитной обстановки. Способ совместим с аналоговыми и цифровыми системами БПЛА и может быть реализован как на наземной станции, так и на бортовых одноплатных компьютерах при ограниченных вычислительных ресурсах.

В перспективе планируется расширение количества реальных OSD-кадров с учётом различных шрифтов, схем отображения и метеоусловий, а так-

же исследование облегчённых архитектур и методов сжатия моделей для исполнения вычислительных платформ с возможностью установки их на БПЛА.

Дополнительно предполагается объединение показателей LQ, RSSI, SNR в единую решающую логику с учётом динамики изменения во времени. Планируется перенос системы на одноплатный компьютер класса Raspberry Pi или аналогичный модуль. Видеосигнал будет подаваться через вход HDMI. Связь с передатчиком будет происходить по UART или через USB. Ожидаемая скорость обработки не ниже 25 кадров в секунду при разрешении до 720 строк. Такой вариант не изменяет радиотракт и не создаёт дополнительной нагрузки на канал управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

Литература

1. Ромашенко М.А. Использование искусственных нейронных сетей для оценки воздействия электромагнитных помех / М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, С.Ю. Белая // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 21–27. DOI: 10.18127/j00338486-202308-04.

2. Vehicle detection in drone aerial views based on lightweight OSD-YOLOv10 / Y. Zhang, X. Chen, S. Sun et al. // Sci. Rep. – 2025. – No. 15. – P. 25155. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09825-y>

3. Dive into Deep Learning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://d2l.ai/chapter_computer-vision/fine-tuning.html свободный (дата обращения: 15.09.2025).

Ромашенко Михаил Александрович

Д-р техн. наук, проф. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры Воронежского государственного технического университета (ВГТУ)
Эл. почта: kipr@vorstu.com

Паршин Сергей Николаевич

Лаборант-исслед. молодежной лаборатории ВГТУ
Эл. почта: snp.parshin@gmail.com

Васильченко Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, ст. преп. каф. конструирования и производства радиоаппаратуры ВГТУ
Эл. почта: Shadow951@bk.ru

Пухов Дмитрий Анатольевич

Мл. науч. сотр. молодежной лаборатории ВГТУ
Эл. почта: puhovdm22@yandex.ru

Е.А. Деркач, А.А. Шелупанов

Прототип комплексной методики оценки нулевого доверия

С каждым годом всё чаще рассматривается перспективная концепция «нулевого доверия», направленная на обеспечение безопасности любой информации и базирующаяся на ряде положений, среди которых выделяется минимизация полномочий пользователей, постоянное подтверждение личности и регулярный мониторинг событий и состояния системы. Большинство современных публикаций описывает особенности реализации архитектуры «нулевого доверия», в то время как методикам оценки нулевого доверия уделяется крайне мало внимания. Предлагается прототип комплексной методики оценки «нулевого доверия» и рассматриваются критерии его оценки.

Ключевые слова: нулевое доверие, zero trust, безопасная разработка программного обеспечения, методика оценки, критерии оценки.

Впервые предложенная Джоном Киндервагом [1] в 2010 г. концепция «нулевого доверия» всё чаще упоминается в современных подходах к разработке программного обеспечения (ПО). Такой результат вполне закономерен, поскольку данная концепция обладает рядом важных особенностей, минимизирующих влияние человеческого фактора на безопасность информационных систем, а именно:

- всякую информацию в системе обязательно необходимо обезопасить;
- доверие не предоставляется пользователю системы по умолчанию;
- пользователю выделяются минимально необходимые полномочия для выполнения его рабочих задач в системе;
- доступ пользователя к системе осуществляется только ограниченное время, для последующих сеансов необходимо подтверждение личности [2, 3].

Большинство современных работ по «нулевому доверию» направлено на архитектуру программного обеспечения, и было бы вполне логично рассматривать методику оценки только архитектуры нулевого доверия. Согласно жизненному циклу разработки программного обеспечения, архитектура относится к двум его этапам – проектированию и реализации – и не охватывает весь цикл целиком [4]. А если рассматривать концепцию «нулевого доверия» и минимизировать все возможные аспекты влияния, то рациональнее рассматривать все этапы. По этой причине предлагаемая методика не ограничивается только оценкой проектирования и реализации архитектурных решений.

Полный цикл разработки ПО (или даже лучше рассматривать полный цикл разработки безопасного ПО – SSDL (Secure Software Development Life-Cycle)) содержит по разным данным от четырёх до семи этапов, но в среднем можно выделить основные шесть этапов, а именно [5]:

- планирование и анализ требований к будущему ПО (анализ требований безопасности с учётом потенциальных рисков и угроз безопасности, а также стратегии их устранения);
- проектирование архитектуры (выбор архитектурных решений, направленных на обеспечение без-

опасности с применением соответствующих технологий и библиотек);

- непосредственно разработка ПО (написание кода по принципам безопасного программирования с применением статических анализаторов кода для выявления потенциальных уязвимостей);

- его тестирование (проверка качества реализации ПО до этапа передачи пользователю);

- развёртывание (обеспечение безопасных инфраструктуры и окружения для полноценного функционирования ПО);

- эксплуатация, поддержка и мониторинг (поддержка безопасности на протяжении оставшегося цикла с регулярным мониторингом, выявлением уязвимостей и оперативным обновлением ПО).

Концепцию «нулевого доверия» сложно назвать чем-то абсолютным, ведь это больше философия, поскольку абсолютного нулевого доверия достичь невозможно в силу наличия как минимум одного человеческого фактора [6].

Предлагаемая методика оценки нулевого доверия для каждого этапа жизненного цикла разработки безопасного ПО предусматривает от одного до нескольких факторов, потенциально оказывающих влияние на нулевое доверие. На основе этого можно вывести обобщённый критерий

$$\prod_{k=1}^n Z_k = Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_n < 1,$$

где n – количество критериев, Z_n – значение n -го критерия.

Для определённого программного продукта количество критериев может и будет отличаться. Это связано с особенностями его реализации, уровнем критичности данных и требований безопасности. К примеру, для программно-аппаратных комплексов (ПАК) необходимо рассматривать влияние фактора «железа» и загрузчика ОС, для клиентских решений важно уделять внимание особенностям работы ОС, а для серверных приложений необходимо подходить с особой внимательностью к вопросам взаимодействия с сетью.

В таком случае при оценке уровня нулевого доверия следует отмечать количество факторов

критериев, например, проведена оценка нулевого доверия по комплексной методике по 12 критериям.

Говоря о комплексной методике, необходимо отметить и те самые критерии. Со временем их число будет возрастать, тем самым повышая качество и точность оценки нулевого доверия. На текущий момент можно выделить ряд критериев.

1. Покрытие потенциальных угроз безопасности (этап 1. Анализ требований).

Для данного критерия необходимо рассматривать количество потенциальных угроз для определённого программного продукта и сравнивать с тем количеством, которые точно станут неактуальны на последующих этапах жизненного цикла ПО.

2. Уровень полномочий пользователей (этап 2. Проектирование архитектуры).

Существует несколько моделей разграничения доступа – дискреционная, мандатная, ролевая и на основе атрибутов – со своими преимуществами и недостатками. Для определённого рассматриваемого программного продукта могут подходить далеко не все модели. Для каждой модели следует рассматривать свою формулу оценки [7].

3. Многофакторная аутентификация (этап 2. Проектирование архитектуры).

Многофакторная аутентификация для многих пользователей стала неотъемлемой частью работы с информационными системами. В рамках критерия оценки нулевого доверия следует рассматривать количество таких факторов: чем их больше, тем выше защищённость системы, поскольку потенциальному злоумышленнику уже будет сложнее получить доступ к системе.

4. Степень заимствования кода (этап 3. Разработка ПО).

Применение заимствованного программного кода на сегодняшний день далеко не редкость. Существует огромное количество актуальных и мощных решений на базе открытого кода. Однако, применяя такой код, есть риск пропустить потенциальную уязвимость. Чем больше собственного кода, тем выше безопасность продукта.

5. Критерий на основе статического анализа кода (этап 3. Разработка ПО).

Не всегда наличие большего процента собственного кода обеспечивает его безопасность и покрытие потенциальных уязвимостей. В таком случае следует проводить статический анализ собственного кода и устранять некорректные конструкции.

6. Критерий на основе композиционного анализа кода (этап 3. Разработка ПО).

Динамический анализ кода позволяет выявить ряд уязвимостей, не определяемых при статическом анализе. По этой причине следует рассматривать критерий на основе композиционного анализа кода.

7. Особенности прошивки материнской платы и «железа» (этап 3. Разработка ПО).

Для ПАК актуальным будет вопрос оценки и покрытия потенциальных уязвимостей, связанных с прошивкой «железа».

8. Покрытие программного кода unit-тестами (этап 3, 4. Разработка и тестирование).

Критерий на основе покрытия программного кода unit-тестами можно отнести сразу к двум этапам жизненного цикла разработки безопасного ПО. Чем больше конструкций кода покрыто тестами, тем больше потенциальных уязвимостей можно устранить в процессе тестирования.

9. Критерий эффективности фаззинг-тестирования и пентестов (этап 3, 4. Тестирование).

Фаззинг-тестирование – весьма мощный и комплексный инструмент, позволяющий при определённых настройках проводить и нагрузочное, и тестирование проникновения, и отказоустойчивость. Чем меньше потенциальных уязвимостей найдено в процессе данных видов тестирования, тем выше уровень безопасности. Возможно, данный критерий стоит разделить по отдельным видам тестирования.

10. Покрытие функционала ПО автотестами (этап 4. Тестирование).

Автотестирование – весьма удобный инструмент, поскольку позволяет проводить проверки потенциальных уязвимостей ПО в многопоточном режиме. Чем больше функционала покрыто автотестами, тем выше вероятность найти потенциальную проблему в ПО.

11. Микросегментация сети (этап 5, 6. Развёртывание и эксплуатация).

Один из вариантов повышения безопасности – разделение сетей на отдельные сегменты, усложняя тем самым сетевую инфраструктуру. Также возможно добавить динамизацию топологии сети с периодической сменой адресации и точками доступа между узлами [8].

12. Аудит системных логов (этап 6. Эксплуатация).

Аудит системных логов можно считать одним из видов гигиены в вопросах безопасности информационных систем. Он позволяет своевременно реагировать на обнаруженные проблемы, сбои и неисправности в системных процессах, оперативно внося правки в ПО для устранения уязвимостей и повышения безопасности.

Литература

1. Kingervag J. Build Security Into Your Network's DNA: The Zero Trust Network Architecture / J. Kingervag, S. Balaouras, L. Coit // Forrester Research Inc. – 2010. – P. 1–26.
2. Theory and Application of Zero Trust Security: A Brief Survey / H. Kang, G. Lui, Q. Wang, L. Meng, J. Liu // Entropy. – 2023. – Vol. 25. – P. 1–26.
3. Never trust, always verify: A multivocal literature review on current knowledge and research gaps of zero-trust / C. Buck, C. Olenberger, A. Schweizer, F. Völter, T. Eymann // Computers & Security. – 2021. – Vol. 110. – P. 102436.
4. Ховард Р. Кибербезопасность: главные принципы. – СПб.: Питер, 2024. – 320 с.: ил.
5. Secure software development and testing: A model-based methodology / V. Casola, A. Benedictis, C. Mazzocca, V. Orbinato // Computers & Security. – 2024. – Vol. 137. – P. 1–16.

6. Theory and Application of Zero Trust Security: A Brief Survey / H. Kang, G. Lui, Q. Wang, L. Meng, J. Liu // Entropy. – 2023. – Vol. 25. – P. 1–26.

7. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем. Управление доступом и информационными потоками: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 320 с.

8. Олифер В.Г. Безопасность компьютерных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 644 с.

Деркач Евгений Александрович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: ead@fb.tusur.ru

Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. КИБЭВС, член-кор. РАН, президент ТУСУРа
ORCID: 0000-0003-2393-6701
Эл. почта: saa@fb.tusur.ru

Д.А. Баранов, А.А. Конев, А.А. Шелупанов

Оценка схем групповой аутентификации роя БПЛА в сетях FANET

Проводится сравнительный анализ схем групповой аутентификации в сетях FANET, применяемых для защиты каналов связи роя беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются ключевые характеристики различных криптографических механизмов, включая их влияние на энергопотребление, задержки в канале передачи данных и масштабируемость при увеличении числа участников сети. Для исследования использовалась среда моделирования NS-3, в которой были реализованы протоколы групповой аутентификации и типичные сценарии мобильности роя. Результаты показывают, что выбор схемы аутентификации оказывает прямое влияние на эффективность функционирования роя при выполнении миссий с повышенными требованиями к безопасности и автономности.

Ключевые слова: БПЛА, FANET, групповая аутентификация, NS-3, масштабируемость, энергопотребление, задержки.

Сети FANET представляют собой динамичные объединения беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающих обмен данными в реальном времени между участниками роя и наземными станциями. Одним из ключевых факторов, влияющих на надёжность таких сетей, является информационная безопасность. В условиях разведывательных, спасательных или транспортных операций важно гарантировать подлинность узлов и целостность передаваемых данных [1].

Традиционные схемы точечной аутентификации плохо масштабируются при большом числе БПЛА, вызывая значительные задержки и повышенное энергопотребление узлов [2]. Поэтому актуальной задачей становится выбор эффективной групповой аутентификации, позволяющей одновременно подтверждать подлинность множества участников роя при минимальных издержках.

Подходы к групповой аутентификации

Существует несколько классов протоколов групповой аутентификации, каждый из которых имеет уникальные преимущества и ограничения:

- Схемы на основе деревьев ключей (Key Tree-based) – строят иерархическую структуру распределения ключей, обеспечивая быстрое обновление при входе/выходе участников, но требуют дополнительной памяти для хранения дерева.

- Протоколы Blockchain – применяют децентрализованную модель доверия с распределённым журналом, обеспечивая высокий уровень устойчивости к атаке «злого узла», но обладают повышенной задержкой из-за обработки блоков [3].

- Схемы с динамическими сертификатами (Certificate-based) – используют инфраструктуру открытых ключей с адаптивным обновлением сертификатов, демонстрируя низкую задержку при малых группах, но испытывают трудности при росте количества узлов [4].

- Группы с многоуровневым сеансовым ключом (Multi-Session Group Key) – формируют временные ключи для отдельных миссий [5], что снижает энергопотребление, но требует частой синхронизации.

Каждая схема по-разному реагирует на увеличение числа БПЛА, изменение топологии роя и ча-

стоту обновления ключей [6, 7], что определяет их эффективность в реальных миссиях.

Модели мобильности

Для имитации динамики движения беспилотников использовались модели мобильности, отражающие характерное поведение роя:

- Random Waypoint – случайный выбор точек назначения с непредсказуемыми траекториями.

- Smooth Random Waypoint – аналогичная модель с плавными поворотами, повышающими реалистичность движения.

- Enhanced Gauss–Markov – учитывает корреляцию скоростей соседних узлов, характерную для плотных роев.

- Distributed Pheromone Repel – имитация распределённого развёртывания с учётом зон минимальной активности для равномерного покрытия области.

Эти модели позволяют исследовать влияние скорости перемещения и частоты топологических изменений на задержку аутентификации и устойчивость к потере ключей.

Среда моделирования

В качестве среды моделирования выбрана NS-3 по следующим причинам:

- Эмуляция сетевых задержек – для исследования групповой аутентификации в FANET критично учитывать реальные задержки передачи данных в беспроводном канале (канальные задержки, MAC-коллизии, межпакетные интервалы). NS-3 реализует физический и канальный уровни (Wi-Fi, LTE), что позволяет детально учитывать влияние пропускной способности, потерь пакетов и интерференции на задержку аутентификации.

- Гибкость масштабирования – NS-3 поддерживает моделирование сетей с числом узлов от нескольких единиц до сотен. Это важно для оценки масштабируемости групповой аутентификации, когда число БПЛА варьирует от небольшого роя (20–50 устройств) до крупного (100–200 узлов).

- Поддержка криптографических операций – открытый исходный код и возможность внедрения пользовательских модулей позволяют интегрировать

модели энергопотребления при криптографических вычислениях и симулировать алгоритмы распределения ключей, что недоступно во многих закрытых симуляторах.

– Реалистичность каналов передачи – NS-3 поддерживает современные беспроводные технологии (Wi-Fi 802.11s, LTE, 5G), обеспечивая моделирование помех, ослабления сигнала и реальных профилей трафика, что критично для оценки влияния групповой аутентификации на задержки в канале передачи данных.

– Инструменты статистики – симулятор позволяет собирать детальные метрики: распределение задержек, энергопотребление на каждую криптографическую операцию, процент потерянных пакетов, что упрощает построение графиков и таблиц.

Описание эксперимента

Эксперимент проводился в несколько этапов с целью сравнения схем групповой аутентификации по энергопотреблению, задержкам в канале передачи данных и масштабируемости.

На рис. 1 представлена схема расположения узлов в сети. Подвижные абоненты, траектория которых задаётся моделью мобильности, обозначены кругами. Стационарное устройство управления (пульт) расположено в центре и обозначено ромбом. Связь между абонентами обеспечивается через базовую станцию, выполняющую роль связующего звена. В рамках данной архитектуры все узлы сети обязаны проходить процедуру аутентификации.

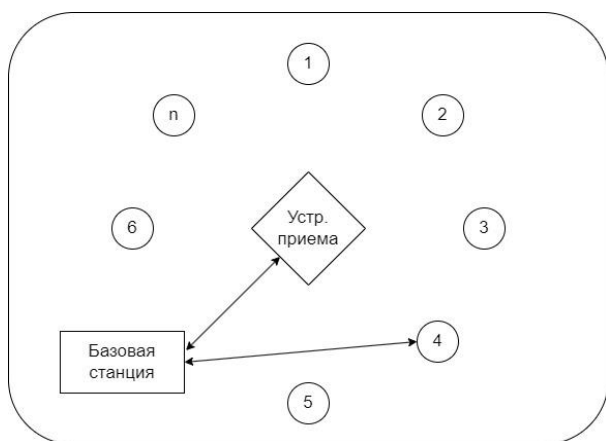


Рис. 1. Схема расположения устройств в сети

Основные показатели моделирования определяются следующим набором условий и критериев:

1. Параметры моделирования.

– Число узлов роя: 20, 50, 100.

– Технология связи: Wi-Fi 802.11s с диапазоном 2, ГГц.

– Топология: случайное распределение узлов на площади 1 км² с постоянным перемещением по модели Smooth Random Waypoint.

– Скорость движения БПЛА: 5–15 м/с.

– Диапазон радиуса связи: 300 м.

– Частота обновления ключей: каждые 30 с для динамических схем.

2. Измеряемые метрики.

– Задержка в канале передачи данных – среднее время доставки пакета между двумя узлами в процессе аутентификации, включая задержки MAC, ретрансляции и маршрутизации. Измеряется в миллисекундах.

– Время аутентификации – общее время от начала запроса на групповую аутентификацию до подтверждения всех узлов.

– Энергопотребление – среднее потребление энергии каждым узлом за одну сессию аутентификации (мДж), учитывающее как передачу данных, так и криптографические операции.

– Масштабируемость – рост задержки и энергопотребления в зависимости от числа узлов.

3. Сценарий проведения.

– Для каждого числа узлов (20, 50, 100) моделировались четыре схемы аутентификации: Key Tree, Blockchain, Dynamic Certificate, Multi-Session Key.

– Для каждой схемы фиксировались три независимых прогона по 600 с моделируемого времени.

– Собирались усреднённые значения: средняя задержка канала, время установления группового ключа, энергопотребление.

Результаты

В таблице представлены результаты эксперимента по оценке эффективности различных схем групповой аутентификации. Исследуемыми метриками выступили средняя задержка в канале связи, полное время аутентификации и энергопотребление на узел. Эксперимент проводился для трёх различных масштабов сети, количество узлов в которой составляло 20, 50 и 100.

Результаты эксперимента

Схема аутентификации	Кол-во узлов	Средняя задержка канала, мс	Время аутентификации, мс	Энергопотребление на узел, мДж
Key Tree	20	6,5	120	18
	50	8,2	170	22
	100	11,7	250	29
Blockchain	20	9,3	280	35
	50	12,5	420	50
	100	18,8	610	72
Dynamic Certificate	20	5,9	90	25
	50	9,7	210	41
	100	16,4	390	68
Multi-Session Key	20	6,8	140	20
	50	9,4	190	27
	100	13,2	270	35

Сравнительный анализ показал, что:

– схемы на основе деревьев ключей демонстрируют минимальное энергопотребление и стабильную задержку при числе узлов до 100, но требуют сложной синхронизации при частом изменении топологии;

– Blockchain-системы обеспечивают максимальную устойчивость к компрометации, однако задержка аутентификации возрастает до 1,8–2,1 с при росте числа узлов более 80;

– динамические сертификаты эффективны для малых роёв (до 50 БПЛА), обеспечивая задержку менее 0,5 с, но энергопотребление возрастает экспоненциально с ростом группы;

– многоуровневый сеансовый ключ показал оптимальный баланс при средних размерах роя (50–100 узлов), обеспечивая до 20% экономии энергии по сравнению с Dynamic Certificate.

Заключение

Проведённый анализ показал, что выбор схемы групповой аутентификации существенно влияет на энергопотребление и задержку передачи данных в сетях FANET.

Схема Key Tree обеспечивает наименьшее энергопотребление и умеренный рост задержки при увеличении числа узлов, что делает её эффективной для масштабных роев. Blockchain демонстрирует наивысшую устойчивость к компрометации, но сопровождается трёхкратным ростом задержки при переходе от 20 к 100 узлам, что ограничивает её применение в миссиях реального времени. Dynamic Certificate характеризуется минимальной задержкой при малых размерах роя (до 50 узлов), однако энергопотребление резко возрастает с ростом числа участников. Multi-Session Key обеспечивает сбалансированные показатели скорости и энергозатрат, сохраняя стабильную работу при увеличении количества узлов.

Таким образом:

– для малых роёв (20–50 узлов) предпочтительна схема Dynamic Certificate;

– Для средних и крупных (50–100 узлов) – Key Tree и Multi-Session Key;

– Blockchain рекомендуется для задач, где приоритетом является устойчивость и децентрализация, а не минимальная задержка.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку адаптивных гибридных схем, способных динамически выбирать оптимальный режим работы в зависимости от размера роя и требований к безопасности и производительности.

Литература

1. Баранов Д.А. Модель группового распределения БПЛА в среде моделирования NS-3 / Д.А. Баранов, Д.С. Брагин // Перспективы развития фундаментальных наук. – 2023. – Т. 7. – С. 22–24.
2. Баранов Д.А. Оценка производительности схем аутентификации БПЛА в сетях FANET / Д.А. Баранов, А.А. Конев // Электронные средства и системы управления. – 2024. – Т. 2. – С. 122–124.
3. Blockchain-Based Group Key Management Scheme for IoT with Anonymity of Group Members / J.C. Pérez-García, A. Braeken, A. Benslimane // IEEE Trans. Inf. Forensics Security. – 2024. – Vol. 19. – P. 6709–6721.
4. Attribute-Based Authentication in Secure Group Messaging for Distributed Environments / D. Soler, C. Dafonte, M. Fernández-Veiga, V.A. Fernández, F.J. Nóvoa // arXiv (preprint) / to appear in peer-reviewed venue. – 2024.
5. A Survey on Key Management and Authentication Mechanisms in Smart Grid / M.S. Abdalzaher, Z. Elezabi et al. // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 5. – Article 2355.
6. Blockchain-Enabled Authenticated Key Agreement Scheme for Mobile Vehicles-Assisted Precision Agricultural IoT Networks / A. Vangala, A.K. Das, A. Mitra, S.K. Das, Y. Park // IEEE Trans. Inf. Forensics Security. – 2023. – Vol. 18. – P. 904–919.
7. Ohashi S. Multiparty Selective Disclosure using Attribute-Based Encryption // arXiv preprint. – 2025.

Баранов Дмитрий Александрович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: bda@csp.tusur.ru

Конев Антон Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: kaa@fb.tusur.ru

Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. КИБЭВС, член-кор. РАН, президент ТУСУРа
ORCID: 0000-0003-2393-6701
Эл. почта: saa@fb.tusur.ru

Д.С. Гекк, А.О. Терехин

Моделирование системы массового обслуживания шифраторов в сети квантового распределения ключей с учётом переменной скорости их генерации

Представлены результаты моделирования системы массового обслуживания (СМО) шифраторов в сети квантового распределения ключей (КРК), в которой генерация квантовых ключей моделируется с учетом случайной скорости, описываемой бета-распределением. В модели шифраторы формируют поток заявок на получение квантовых ключей, а сеть КРК выступает в роли обслуживающего устройства с буфером предварительно сгенерированных ключей. Моделирование проведено в среде MatLab/Simulink для различных расстояний между узлами (от 1 до 50 км) и широкого диапазона интенсивностей входного потока заявок. Полученные результаты демонстрируют влияние динамической скорости генерации на загрузку системы и позволяют определить критические параметры, при которых система переходит в режим перегрузки.

Ключевые слова: системы массового обслуживания (СМО), квантовое распределение ключей (КРК), имитационное моделирование, бета-распределение, загруженность системы, сеть КРК.

Развитие квантовых коммуникационных технологий сопровождается ростом числа пользователей, использующих сети квантового распределения ключей (КРК) для обеспечения физически защищённого обмена криптографическими ключами [1]. С увеличением количества пользователей и объёмов передаваемых данных существенно возрастает нагрузка на инфраструктуру КРК, в особенности на магистральные узлы, что может привести к ухудшению параметров обслуживания, увеличению задержек при выдаче ключей и снижению надёжности функционирования сети в целом.

Для обеспечения требуемого уровня масштабируемости и отказоустойчивости КРК необходима количественная оценка её производительности в условиях переменной нагрузки. Одним из инструментов такого анализа являются методы теории систем массового обслуживания (СМО), позволяющие формализовать процессы генерации, обработки и распределения квантовых ключей в виде стохастической модели [2].

В предлагаемой модели КРК, построенной на основе теории систем массового обслуживания (СМО), шифратор выступает в роли источника запросов на квантовые ключи, которые необходимы для защиты передаваемых данных. Эти запросы направляются в систему КРК, где происходит процесс генерации ключей. Для оптимизации обработки заявок используется очередь, которая временно хранит входящие запросы, а также буфер, в котором содержатся ранее сформированные ключи, что позволяет уменьшить время ожидания и повысить общую производительность системы [3].

В предыдущих исследованиях работа системы КРК рассматривалась при условии постоянной скорости генерации ключей. Однако на практике этот параметр является случайной величиной, обусловленной совокупностью факторов, таких как характеристики оптической линии передачи, уровень потерь и шумов в системе, а также параметры используемого фотонного детектора [5].

В данной работе представлена усовершенствованная модель системы массового обслуживания (СМО), предназначенная для анализа функционирования шифраторов в сети квантового распределения ключей (КРК). Ключевая особенность модели заключается в том, что скорость генерации квантовых ключей рассматривается как случайная величина, подчинённая бета-распределению. Это позволяет учитывать стохастический характер генерации ключей, обусловленный физическими свойствами квантового канала и внешними факторами.

Разработанная математическая модель описывает процесс генерации ключей с использованием бета-распределения, параметры которого (α и β) вычисляются на основе экспериментальных данных, полученных с реального оборудования. Эти параметры определяются эмпирическими полиномиальными зависимостями третьего порядка, полученными в результате аппроксимации экспериментальных данных:

$$\alpha(x) = 0,000556x^2 - 0,0369x^2 + 0,0952x^2, \quad (1)$$

$$\beta(x) = 0,000012x^3 + 0,00075x^2 + 0,0047x + 2,2, \quad (2)$$

где x – длина квантового канала.

На основе рассчитанных значений $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ формируется функция плотности вероятности бета-распределения [6].

$$f_{\tau}(x, \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad \text{для } 0, \quad (3)$$

где $B(\alpha, \beta)$ – это бета-функция, которая нормализует распределение.

Генерация значения скорости происходит путём выборки случайного числа из распределения на интервале $[0; 1]$, после чего оно масштабируется с использованием коэффициента $k(x)$, также зависящего от расстояния.

$$k(x) = 0,0012x^2 - 0,0729x^2 - 0,3968x + 62,97. \quad (4)$$

Таким образом, итоговая формула для оценки скорости генерации квантового ключа принимает вид

$$\text{QuantumKeyRate} \approx k(x) \times B(\alpha(x), \beta(x)). \quad (5)$$

На основе полученных полиномиальных функций была доработана имитационная модель СМО в среде MatLab / Simulink [4]. В частности, был усовершенствован блок «Speed_and_time», отвечающий за расчёт скорости и времени генерации ключей. Этот блок теперь учитывает параметры бета-распределения (α , β) и коэффициент масштабирования k , которые динамически вычисляются в зависимости от расстояния между узлами сети.

Моделирование системы КРК с динамической скоростью генерации ключей проводилось для следующих фиксированных значений расстояния между узлами: 1, 7, 15, 25, 37 и 50 км. Для каждого расстояния задавались 8 различных уровней интенсивности входящего потока заявок.

В ходе эксперимента исследовалась зависимость ключевых характеристик системы, таких как

среднее количество заявок в очереди и системе, число отклонённых заявок, среднее время ожидания и загрузка – от входных параметров. Загрузка системы определялась как отношение интенсивности входного потока к средней скорости генерации ключей при заданном расстоянии.

Постоянными параметрами моделирования являлись: размер очереди (10 заявок), длина ключа (256 бит), объём буфера хранения (51 200 бит) и время моделирования. Это обеспечивало сопоставимость результатов и объективность анализа.

На рис. 1, *а* представлен график зависимости загрузки системы от интенсивности входного потока при разных расстояниях и постоянной скорости генерации ключей. Аналогично на рис. 1, *б* отображена зависимость при динамически изменяющейся скорости генерации ключей.

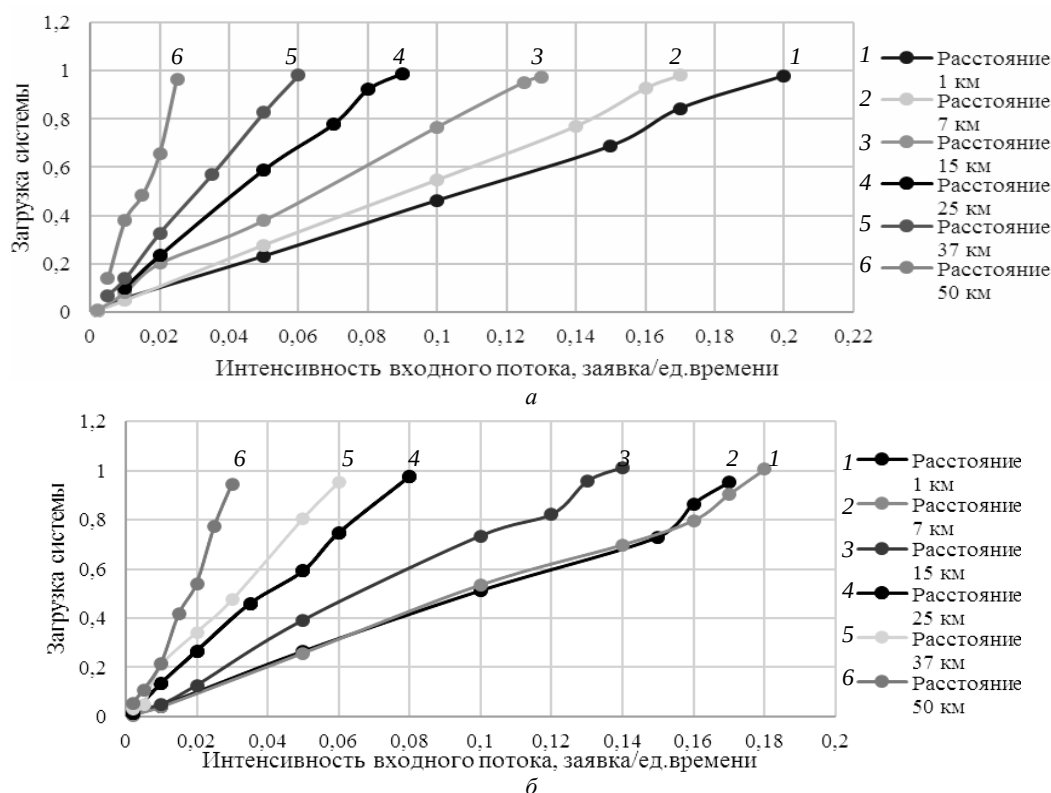


Рис. 1. Графики зависимости загрузки системы от входного потока при разных расстояниях и скорости генерации: *а* – постоянной; *б* – динамической

Анализ графиков загрузки системы при моделировании с постоянной и динамической скоростью генерации ключей выявил различия в характере её поведения. В случае модели с фиксированной скоростью наблюдается практически линейная зависимость между интенсивностью входного потока и уровнем загрузки системы, что соответствует классическим представлениям теории СМО. Увеличение расстояния между узлами приводит к снижению пропускной способности, что обусловлено ростом потерь в квантовом канале и, как следствие, уменьшением скорости генерации ключей.

На малых расстояниях влияние стохастических колебаний генерации минимально, поэтому значения

скорости генерации ключей остаются достаточно стабильными. Значения загрузки для этих расстояний становятся близкими друг к другу во всем исследованном диапазоне интенсивностей входного потока. Это позволяет заключить, что при малых расстояниях система функционирует практически идентично, что обеспечивает более высокую пропускную способность при обработке входящих запросов.

С увеличением расстояния возрастает нестабильность процесса генерации, что приводит к увеличению разброса значений скорости и снижению пропускной способности.

Кроме того, в модели с динамической скоростью наблюдается уменьшение диапазона интенсивностей входного потока, при которых система остаётся в устойчивом режиме (т.е. загрузка не превышает единицу). Это указывает на снижение предельной производительности системы при учёте стохастического характера генерации ключей, что важно учитывать при проектировании и эксплуатации сетей КРК.

Моделирование показало влияние стохастического характера генерации квантовых ключей на производительность системы и её зависимость от расстояния между узлами. Результаты подтверждают необходимость учета вероятностных факторов при проектировании и эксплуатации сетей КРК, а также актуальность применения методов теории систем массового обслуживания для анализа и оптимизации их параметров. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка моделей и алгоритмов адаптивного управления ресурсами, учитывающих динамические изменения характеристик квантового канала и интенсивности потока за-явок.

Литература

1. Нильсен М.А. Квантовая вычислительная техника и квантовая информация / М.А. Нильсен, И.Л. Чуанг. – М.: МЦНМО, 2021. – 824 с.
2. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 264 с.

3. Система массового обслуживания в сетях квантового распределения ключей / Д.С. Гекк, В.Д. Пинчук, Д.В. Ожигов, А.О. Терехин // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф. (20–22 ноября 2024 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), ТУСУР, 2024. – С. 78–80.

4. Моделирование системы массового обслуживания шифраторов в сети квантового распределения ключей / Д.С. Гекк, А.А. Лукашов, В.Д. Пинчук, А.О. Терехин // Сборник изб. статей научной сессии ТУСУР по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2025», г. Томск, 21–23 мая 2025 г.: в 3 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), 2025. – Ч. 3. – С. 50–54.

5. Скорость генерации кода в системе квантового распределения ключей / А.С. Задорин, А.В. Максимов, Д.А. Махорин, С.О. Чечулин, А.А. Маликов // Доклады ТУСУР. – 2011, № 2 (24), ч. 2. – С. 139–141.

6. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королук, Н.И. Портенко, А.В. Ско-роход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

Гекк Диана Сергеевна

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: gds@fb.tusur.ru

Терехин Александр Олегович

Ст. преп. каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: tao@fsp.tusur.ru

С.А. Пашкевич, К.И. Цимбалов, В.Г. Крючков, С.Е. Малиновский, И.В. Трусов

Обзор программных и программно-аппаратных комплексов для генерации сетевого трафика

Дан обзор существующих решений для генерации сетевого трафика. Выделены преимущества и недостатки каждого из представленных генератора сетевого трафика.

Ключевые слова: генератор сетевого трафика, протокол, пакет, сеть.

На текущий момент на рынке генераторов сетевого трафика представлены различные бесплатные и коммерческие решения.

Среди бесплатных инструментов можно выделить iPerf, Cisco TRex, Scapy, wrk, Apache JMeter, Gatling и MoonGen. Не каждый продукт напрямую является генератором сетевого трафика, однако они используются для тестирования пропускной способности, нагрузки и различных сетевых сценариев. Недостатки большинства бесплатных решений в том, что они обладают ограниченными возможностями, ориентированы на узкий круг задач и не всегда подходят для высоконагруженных корпоративных сред.

Среди коммерческих продуктов можно выделить Keysight IXIA BreakingPoint, Spirent Communications и Xena Networks Valkyrie, которые обеспечивают высокую точность генерации трафика, масштабируемость и поддержку различных сетевых протоколов.

Данные решения часто используются в промышленности и крупных дата-центрах для симуляции сложных сценариев сетевого взаимодействия. Несмотря на большое количество бесплатных решений, именно платные продукты чаще оказываются необходимыми при выполнении задач, требующих высокой производительности, гибкости конфигурации и достоверной эмуляции сетевого поведения.

Целью текущей работы является обзор программных и программно-аппаратных решений для генерации сетевого трафика. Это позволит выделить функциональные возможности комплексов генерации сетевого трафика для собственной реализации генератора сетевого трафика

Программные решения

iPerf [1] – это инструмент для активного измерения максимально достижимой пропускной способности IP-сетей. Поддерживает настройку различ-

ных параметров, связанных с синхронизацией, буферизацией и протоколами (TCP, UDP, SCTP с IPv4 и IPv6).

Scapy [2] – это мощная интерактивная библиотека для работы с пакетами, написанная на Python. Способна подделывать или декодировать пакеты широкого спектра протоколов, передавать их по сети, перехватывать, а также сопоставлять запросы и ответы.

Apache Jmeter [3] – это программное обеспечение с открытым исходным кодом, полностью написанное на Java. Предназначено для нагрузочного тестирования функциональности и измерения производительности.

Gatling [4] – это фреймворк для нагрузочного тестирования HTTP и WebSocket. Обладает низким потреблением ресурсов и автоматической генерацией отчётов. Способен интегрироваться в DevOps-процессы и эмулировать тысячи виртуальных пользователей.

Ostinato [5] – это генератор пакетов с графическим интерфейсом и возможностью автоматизации через Python-скрипты. Позволяет создавать и отправлять пакеты из нескольких потоков по разным протоколам с разной скоростью.

В табл. 1 представлены преимущества и недостатки программных генераторов сетевого трафика.

Программно-аппаратные решения

В табл. 2 представлены преимущества и недостатки программно-аппаратных генераторов сетевого трафика.

Keysight IXIA BreakingPoint [6] – это флагманский комплекс для тестирования корпоративных и операторских сетей. Позволяет генерировать реалистичный трафик для полного тестирования производительности и безопасности сетевой инфраструктуры.

Таблица 1

Программные генераторы сетевого трафика

Название	Назначение / особенности	Преимущества	Недостатки
iPerf	TCP/UDP-тест пропускной способности	Простота, кроссплатформенность, измерения QoS	Базовые функции, не поддерживает сложные сценарии
Scapy	Конструктор пакетов, ручное создание пакетов разных типов	Высочайшая гибкость, поддержка всех протоколов	Сложность, требует знания сетевых стеков
Ostinato	GUI-инструмент для генерации произвольного трафика	Удобный интерфейс, поддержка разных протоколов	Меньшая гибкость, чем у Scapy
Apache JMeter	Нагрузочное тестирование веб-приложений	Расширенные отчёты, поддержка множества протоколов	Не специализирован на сетевом уровне
Gatling	HTTP(S) нагрузочное тестирование	Интеграция в CI/CD, скрипты на Scala	Нужны навыки разработки

Таблица 2

Программно-аппаратные генераторы сетевого трафика

Название	Назначение / особенности	Преимущества	Недостатки
Cisco TRex	Высокоскоростной генератор, использует DPDK	До 100+ Гбит/с, профили нагрузок, профессиональный уровень	Требуется поддерживаемое оборудование, сложность запуска
MoonGen	Скриптуемый генератор с DPDK и Lua	Наносекундная точность, полная кастомизация трафика	Требуется глубокой настройки и знания Lua
Keysight IXIA BreakingPoint	Промышленный тестовый комплекс: генерация, эмуляция, анализ трафика, DoS, QoS, NAT, DPI	Профессиональные тесты L2–L7, высокая точность, поддержка протоколов, API, GUI	Высокая стоимость, закрытый код, требует лицензий и обученного персонала

Cisco Trex [7] – это комплекс с открытым исходным кодом на базе DPDK. Способен генерировать трафик уровней L3-7, включает поддержку нескольких потоков и возможность изменения любого поля пакета.

MoonGen [8] – это высокоскоростной генератор пакетов на базе DPDK и Lua. Генератор нагрузки управляется скриптом Lua, а все отправляемые пакеты формируются пользовательским скриптом.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рынок генераторов сетевого трафика достаточно обширный, но большинство решений имеет ограниченный функционал. При этом такие инструменты, как Cisco TRex и Keysight IXIA BreakingPoint, имеют достаточно широкий спектр возможностей для нагрузочного тестирования и тестирования безопасности.

Литература

1. iPerf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iperf.fr>, свободный (дата обращения: 02.08.2025).
2. Scapy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scapy.net>, свободный (дата обращения: 04.08.2025).
3. Apache JMeter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jmeter.apache.org>, свободный (дата обращения: 09.08.2025).
4. Gatling [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gatling.io>, свободный (дата обращения: 10.08.2025).
5. Ostinato [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ostinato.org>, свободный (дата обращения: 16.08.2025).

6. IXIA BreakingPoint [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/us/en/products/network-security/breakingpoint.html>, свободный (дата обращения: 20.08.2025).

7. Cisco TRex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trex-tgn.cisco.com>, свободный (дата обращения: 21.08.2025).

8. MoonGen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/emmericp/MoonGen>, свободный (дата обращения: 23.08.2025).

Пашкевич Станислав Александрович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: psa@fb.tusur.ru

Цимбалов Кирилл Игоревич

Аспирант каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: cki@nti.tusur.ru

Крючков Виталий Геннадьевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: vitaly.kryuchkov.q@gmail.com

Малиновский Станислав Евгеньевич

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: stas.malinovskiy.05@mail.ru

Трусов Иван Владимирович

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа
Эл. почта: ewan31tr@gmail.com

М.В. Ёрхов, В.А. Фаерман

Исследование протокола согласования ключей в системах квантового распределения ключей на основе ТРМ-нейросетей

Рассматривается протокол согласования ключей для систем квантового распределения ключей (КРК), основанный на использовании древовидных машин чётности (Tree Parity Machine). Представлена идея преобразования ключевого материала в веса нейронной сети. Проведены два эксперимента, направленных на исследование зависимости числа итераций синхронизации и объёма разглашённой информации от вероятности битовой ошибки (QBER) и диапазона весов в нейронной сети. Полученные результаты демонстрируют наличие прямой зависимости среднего числа итераций синхронизации от QBER, увеличение числа итераций при расширении диапазона возможных значений весов, а также снижение объёма разглашённой информации при увеличении этого диапазона. На основе результатов сделаны выводы о применимости протокола и целесообразности дальнейших исследований нейрокриптографических методов в контексте задачи согласования ключей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, согласование ключей, нейрокриптография, ТРМ.

Криптография является важным средством обеспечения информационной безопасности, позволяющим предотвращать несанкционированный доступ к информации и обеспечивать её конфиденциальность.

Квантовое распределение ключей (КРК) – относительно новая и активно развивающаяся область, значимость которой возрастает в связи с развитием квантовых вычислений [1]. Неотъемлемым и ключевым аспектом КРК является постобработка распределённой по квантовому каналу ключевой последовательности, что, в свою очередь, предполагает исправление случайно возникающих ошибок на обеих сторонах обмена.

Исторически первым предложенным алгоритмом исправления ошибок является протокол BB84 [2], который послужил прообразом для многих известных протоколов, исследованных в литературе и применяемых в настоящее время [3, 4]. Однако существуют протоколы, основанные на других классах вычислительных методов, которые не получили широкого распространения и не были системно исследованы. Настоящая работа посвящена исследованию протокола согласования ключей на основе сети Tree Parity Machine (TRM), применяемой в криптографии.

Метод согласования ключей

В основе нейрокриптографии лежит использование нейронных сетей для задач шифрования. Наиболее распространённой архитектурой, применяемой в криптографии, является древовидная машина чётности ТРМ [5].

Эта сеть состоит из входного, скрытого и выходного слоёв. Входной слой содержит в себе $K \times N$ нейронов, где K – количество нейронов в скрытом слое, N – количество входов каждого нейрона скрытого слоя (рис. 1) [6]. Выходной слой представлен одним нейроном.

Метод согласования ключей с помощью ТРМ предложен в [7] и описывается далее.

Во-первых, отправитель (Алиса) и получатель (Боб) формируют ТРМ-сети на основе своих битовых строк, преобразуя биты в веса из диапазона $[-L; L]$, которые задают связи между входным и

скрытым слоями. Параметры L , N , K согласуются сторонами заранее. В результате строятся одинаковые по структуре сети с близкими наборами весовых коэффициентов, различия в которых возникают лишь из-за битовых ошибок распределения ключей (QBER).

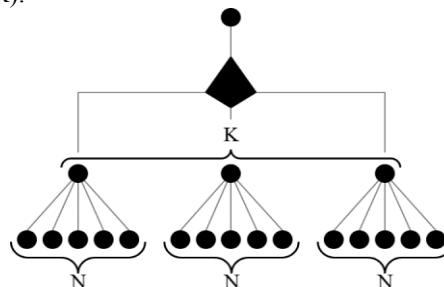


Рис. 1. Диаграмма древовидной машины чётности

Во-вторых, после инициализации сетей производится их синхронизация. На каждом раунде синхронизации Алиса генерирует случайный входной вектор нужной длины и передаёт его Бобу вместе с выходным битом. Боб вычисляет выходной бит на своей стороне и сравнивает его с полученным от Алисы. В случае несовпадения выходных битов Алиса предпринимает новую итерацию в рамках раунда, т.е. генерирует новую последовательность. При совпадении запускается обучение, использующее алгоритмы Хебба, анти-Хебба или блуждающей точки [7]. После корректировки весов на обеих сторонах текущий раунд завершается. Раунды синхронизации повторяются до тех пор, пока веса не станут идентичными.

Наконец, когда веса ТРМ-сетей на обеих сторонах совпадают, Алиса и Боб выполняют обратное преобразование весов в битовую последовательность. Результирующие строки будут совпадать, если сети были успешно синхронизированы [7].

Блок-схема, отражающая описанный метод, представлена на рис. 2.

Безопасность протокола проанализирована в [8]. Методами формализованного анализа было показано, что он устойчив к атакам вида «человек посередине», «маятник», «синхронизация суммирова-

нием», и в аспекте безопасности его стоит рассматривать как перспективный.



Рис. 2. Блок-схема обобщенного алгоритма согласования ключей с помощью нейронной сети

Для количественного исследования протокола была создана программная модель процесса согласования ключей в соответствии с представленным алгоритмом.

Преобразование последовательности в веса

Важным аспектом практической реализации алгоритма является введение обратимой операции преобразования согласуемой битовой строки некоторой длины в множество весовых коэффициентов. Возможным решением является алгоритм, в котором ключевая последовательность разбивается на блоки по b бит каждый. Затем каждый блок переводится в десятичное число, из которого вычитается половина максимального значения при заданном b . Другими словами, полуширина диапазона весов L вычисляется как

$$L = 2^{b-1}. \quad (1)$$

В результате согласуемая битовая строка отображается в весовые коэффициенты, каждый из которых принадлежит диапазону $[-L, \dots, L-1]$.

Недостатком такого подхода является асимметрия диапазона, которая выражается в неравности количества отрицательных и положительных значений в нём. Последнее не имеет значения с точки зрения синхронизации сети, поскольку не влияет на возможность подстройки весовых коэффициентов. Однако, согласно [9], это оказывает влияние на распределение вероятностей коэффициентов, получаемых после корректировки. Последнее снижает энтропию последовательности, получаемой в результате обратного преобразования весовых коэффициентов в битовую строку, но эффект скорее незначителен при достаточно больших L и его присутствие не перевешивает утилитарные преимущества, обусловленные простотой преобразования [9].

Эксперименты с моделью

В рамках исследования производился вычислительный эксперимент, состоящий в выполнении последовательности раундов согласования до полного их совпадения, но не более чем 300 итераций. Необходимо отметить, что здесь не учитывались информационные потери на проверку совпадения последовательностей между раундами. Последнее связано с тем, что такая проверка может производиться различными способами в зависимости от постановки задачи, и по этой причине её введение в модель заслуживает отдельного внимания. Для количественной оценки эффективности протокола использовались следующие метрики:

- отказы (Frame Error Rate, FER), величина, показывающая долю битовых строк (кадров), отброшенных из-за невозможности достичь идентичности весовых коэффициентов;

- объём разглашенной информации, который характеризует уменьшение энтропии последовательности при атаке на неё перебором со стороны злоумышленника, получающего сообщения, передаваемые по некантовому каналу.

Для оценки объёма разглашённой информации Z использовано выражение, предложенное в [7]:

$$Z = \log_{2L+1} 2^i, \quad (2)$$

где i – количество итераций согласования.

С помощью реализованной модели было проведено два эксперимента. Первый эксперимент направлен на установление зависимостей между QBER и количеством итераций i при согласовании ключа, а также между QBER и разглашённой информацией Z .

В эксперименте создаётся ключ длиной $B = 600$ битов, разбитых на блоки по $b = 4$ бита, число нейронов в скрытом слое $K = 10$, число входов на нейрон скрытого слоя $N = 15$. Значение QBER изменяется в диапазоне $[0,005; 0,15]$ с шагом 0,005. Для каждого QBER проводится усреднение по 1 000 измерений.

По итогам первого эксперимента были построены графики зависимости доли отказов FER от

QBER (рис. 3), зависимости объёма информационных потерь Z от QBER (рис. 4). В совместном рассмотрении эти зависимости характеризуют эффективности согласования ключей от параметров квантового канала.

Так, из рис. 3 видно, что между долей отказов FER и QBER существует зависимость, имеющая линейный тренд в практически значимом диапазоне QBER от 0,03 до 0,13. В то же время увеличение QBER приводит к увеличению числа итераций i и, как следствие, увеличению потерь. При этом как FER так и потери Z остаются на относительно невысоком уровне при сравнении, например, с Cascade [4].

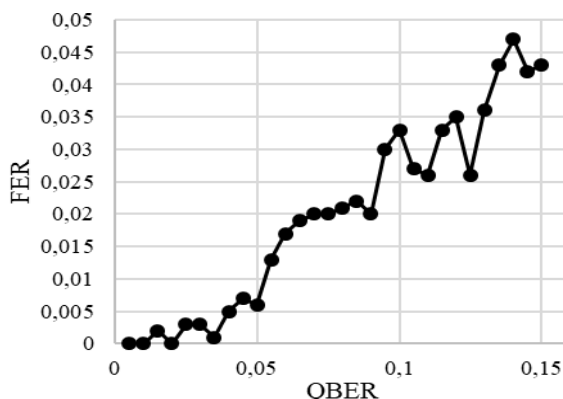


Рис. 3. Зависимость доли отказов FER от вероятности ошибки в канале QBER

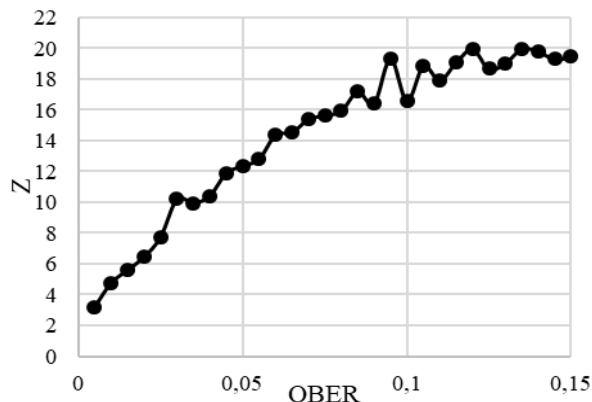


Рис. 4. Зависимость объёма информационных потерь Z от вероятности ошибки в канале QBER

Зависимость увеличения числа итераций i от QBER обусловлена, с одной стороны, увеличением числа неидентичных весовых коэффициентов и, с другой стороны, увеличением разницы между этими коэффициентами. Оба этих фактора повышают вероятность того, что отдельный выход нейронов скрытого слоя в TRM-сетях Алисы и Бобы покажет противоположные результаты. Приближение математического ожидания различающихся битовых выходов к единице увеличивает вероятность нечётного числа различий в выходах скрытого слоя и, следовательно, несовпадения выходов сети в целом.

Второй эксперимент направлен на установление зависимостей между шириной диапазона L и количеством итераций i при согласовании ключа, а также между L и разглашённой информацией Z .

Поскольку L рассматривается как независимая переменная, то b вычисляется в соответствии с (1). В силу этого, при неизменной структуре сети $K = 10$, $N = 15$, длина согласуемой битовой строки определяется в соответствии с

$$n = b \times K \times N. \quad (3)$$

Величина QBER = 0,15 остаётся неизменной.

По итогам второго эксперимента были построены графики зависимости доли отказов FER от L (рис. 5), информационных потерь Z от L (рис. 6). В совместном рассмотрении эти зависимости демонстрируют потенциал оптимизации эффективности алгоритма за счёт выбора его параметров.

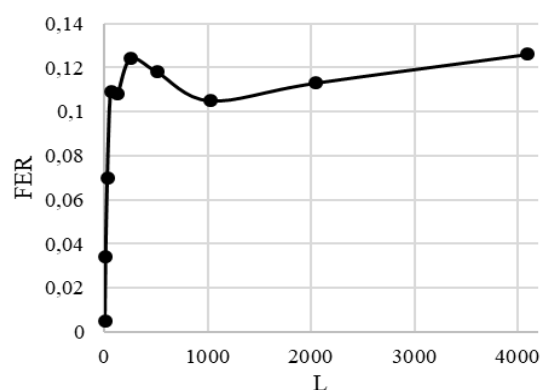


Рис. 5. Зависимость доли отказов FER от полуширины L -диапазона значений весов

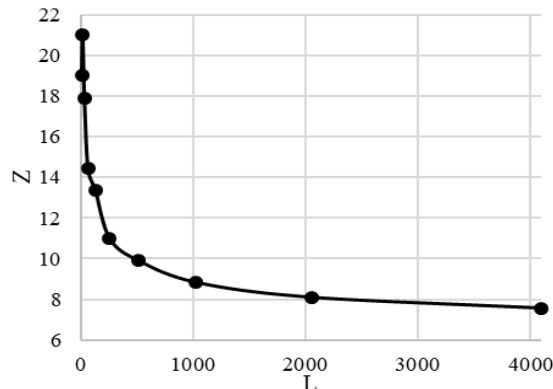


Рис. 6. Зависимость объёма информационных потерь Z от полуширины L -диапазона значений весов L

На рис. 5 показано, что при увеличении значения L величина FER демонстрирует резкий рост в диапазоне $[8; 128]$, однако при дальнейшем увеличении L скорость роста замедляется. В целом наблюдаемые изменения FER остаются ограниченными по масштабу, что свидетельствует о низкой чувствительности отказов при расширении диапазона весов.

Результаты на рис. 6 показывают, что эта зависимость носит гиперболический характер. Так, увеличение диапазона приводит к резкому снижению потерь Z вплоть до $L = 256$, где наблюдается перегиб функции. Это объясняется тем, что с увеличением множества допустимых значений весов поначалу увеличивается число необходимых для синхронизации успешных раундов. Однако затем наступает

насыщение, связанное с ослаблением влияния ошибок в исходных битовых строках на выходы нейронов в скрытом слое и, следовательно, стабилизацией сети [10].

В целом результаты второго эксперимента показывают, что увеличение диапазона значений весовых коэффициентов способствует повышению эффективности согласования ключей, что опосредованно следует из (2). При передаче в открытый канал одного выходного бита объём потерянной информации оказывается тем ниже, чем больше энтропия значений весовых коэффициентов ТРМ-сети. По этой причине расширение диапазона способствует уменьшению информационных потерь на одну итерацию, что частично компенсирует увеличение числа итераций.

Выводы

Согласно результатам проведённых экспериментов, протокол согласования ключей на основе ТРМ-сетей является работоспособным и демонстрирует практическую применимость в системах КРК. Полученные данные подтверждают перспективность методов нейрокриптографии для решения задач постобработки ключевого материала, о чём свидетельствуют продемонстрированные в ходе экспериментов показатели эффективности, не уступающие классическим методам, основанным на контроле чётности. В тоже время методы формальный анализ в работах [10, 11] демонстрирует, что методы нейрокриптографии в КРК обладают требуемой надёжностью.

При этом необходимо отметить, что с одной стороны, применение ТРМ-сетей допускает возможность оптимизации параметров за счёт выбора алгоритма обучения нейросети, диапазона значений весовых коэффициентов и метода кодирования битовой строки в них. С другой стороны, демонстрационные примеры в данной работе не учитывают раундовые потери информации на сверку последовательностей, что оказывает существенное влияние на эффективность алгоритма.

Таким образом дальнейшие исследования в этом направлении целесообразны.

Литература

1. Жияев А. и др. Сети квантового распределения ключей в кибербезопасности. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 152 с.
2. Bennett C.H. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing / C.H. Bennett, G. Brassard // Theoretical Computer Science. – 2014. – Vol. 560. – P. 7–11.
3. Brassard G. Secret-Key Reconciliation by Public Discussion / G. Brassard, L. Salvail // Advances in Cryptology – EUROCRYPT '93 / Edited by: T. Helleseth. – Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994. – Vol. 765. – P. 410–423.
4. Антропов Е.В. и др. Обзор протоколов исправления ошибок Cascade и АУНН в системах квантового распределения ключей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2024. – Т. 8, № 2. – С. 42–57.
5. Kinzel W. Neural Cryptography / W. Kinzel, I. Kanter // arXiv. – 2002.
6. Stypiński M. Weight Equalization Algorithm for Tree Parity Machines / M. Stypiński, M. Niemiec // arXiv. – 2024.
7. Niemiec M. Error correction in quantum cryptography based on artificial neural networks // Quantum Inf Process. – 2019. – Vol. 18, No. 6. – P. 174.
8. Yurchenkov I., Lishchenko T. Synchronization of tree parity machines // UniTech. – 2024. – Vol. 122, – No. 5.
9. Salguero Dorokhin É. On the Development of an Optimal Structure of Tree Parity Machine for the Establishment of a Cryptographic Key / É. Salguero Dorokhin, W. Fuertes, E. Lascano // Security and Communication Networks. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–10.
10. Ruttor A. et al. Genetic attack on neural cryptography // Phys. Rev. E. – 2006. – Vol. 73, No. 3. – P. 036121.
11. Seoane L.F. Successful attack on permutation-parity-machine-based neural cryptography / L.F. Seoane, A. Ruttor // Phys. Rev. E. – 2012. – Vol. 85, No. 2. – P. 025101.

Ёрхов Матвей Вадимович

Студент каф. безопасности информационных систем
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: matveyorkhov@gmail.com

Фаерман Владимир Андреевич

Ст. преп. каф. комплексной информационной
безопасности электронно-вычислительных систем
ТУСУРа
Эл. почта: fva@fb.tusur.ru

Х.Ф.А. Зебари, Е.Ю. Костюченко

Разработка OCR-системы для центральнокурдского языка на базе глубокого обучения

Представлена разработка системы оптического распознавания символов для центральнокурдского языка (сорани) на основе сверточной нейронной сети. Исследование направлено на решение проблемы недостатка цифровых ресурсов для курдского языка, который используют более 30 млн человек по всему миру. Создан обширный корпус данных, включающий 426 747 изображений символов с высоким уровнем разнообразия по шрифтам и качеству. Предложенная архитектура CNN содержит четыре сверточных блока с применением пакетной нормализации, регуляризации и глобального усреднения признаков. Экспериментальные результаты демонстрируют достижение точности классификации 97,28% на тестовой выборке, что подтверждает эффективность предложенного подхода для малоресурсных языков. Модель успешно справляется с распознаванием 33 классов курдских символов различных форм написания. Полученные результаты открывают перспективы для создания полнофункциональных систем оцифровки курдских текстов и расширения доступности электронных ресурсов на курдском языке.

Ключевые слова: оптическое распознавание символов, OCR, курдский язык, сорани, сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, классификация символов, малоресурсные языки, обработка изображений, цифровизация текстов.

Внедрение эффективных систем оптического распознавания символов (OCR) имеет важное значение для оцифровки печатных материалов и создания доступных электронных ресурсов для курдского языка, относящегося к числу малоресурсных. Разработка таких систем осложняется рядом факторов: низким качеством исходных изображений, повреждениями документов, наличием отметок и артефактов, размытостью, а также распространением нестандартных шрифтов. Эти трудности существенно замедляют процесс оцифровки, делая ручной ввод текста крайне затратным по времени [1].

Для решения данных проблем необходимы методы автоматизированного анализа, способные обеспечивать быстрый перевод, распознавание и понимание текстов на разных языках и шрифтах. Современные подходы в области искусственного интеллекта, машинного и глубокого обучения позволяют успешно применять OCR для языков с большим количеством доступных ресурсов, таких как арабский, урду, персидский и английский. На этих языках активно ведутся исследования по классификации текстов, обнаружению рукописей, переводу и интеллектуальному анализу данных [2].

В то же время для курдского языка ситуация значительно сложнее. Отсутствие общих корпусов данных, ограниченный доступ к базам и низкая сопоставимость существующих результатов создают серьезные барьеры для развития OCR-технологий. Несмотря на существование различных методов распознавания и классификации текстов, количество исследований, посвященных именно курдскому языку, остаётся крайне ограниченным.

Обзор существующих исследований

В работе Ясина и Хассани [2] особое внимание уделяется специфике курдской письменности. Авторы предложили метод сегментации, основанный на контурной маркировке, который учитывает курсивное написание и диакритические элементы. Приме-

нение данного подхода позволило достичь среднего уровня распознавания 90,82%, что стало важным шагом в адаптации технологий OCR к языкам с уникальной орфографией, включая курдский.

Исследование Тофика и Хусейна [3] направлено на разработку алгоритма сегментации курдских символов для систем визуального распознавания. Их метод, основанный на предсказательном подходе, продемонстрировал высокую эффективность: точность сегментации курдских слов достигла 98,6% даже в условиях избыточного разбиения.

Значимый вклад был внесён Ахмедом и соавт. [4], которые одними из первых применили методы глубокого обучения для распознавания курдских рукописных символов. Предложенная ими модель показала точность 96%, что существенно улучшило качество офлайн-распознавания текстов.

В другой работе [5] описана гибридная модель, объединяющая скрытую марковскую модель и алгоритм гармонического поиска для задач онлайн-распознавания. Достигнутая точность 93,52% свидетельствует о превосходстве предложенного решения по сравнению с традиционными системами, основанными исключительно на НММ.

Совокупность этих исследований формирует фундамент для дальнейшего развития технологий OCR применительно к курдскому языку. Их результаты демонстрируют, что адаптация современных методов машинного обучения и сегментации открывает перспективы создания более универсальных и надёжных систем распознавания.

Особенности центральнокурдского языка и проблемы OCR

Несмотря на то, что число носителей курдского языка оценивается в 30–35 млн человек по всему миру, он по-прежнему относится к категории языков с ограниченными цифровыми ресурсами. Курдский язык представлен двумя системами письма: латиницей (для курманджи) и арабской графикой (для со-

рани). В настоящей работе основное внимание уделяется письму сорани, которое включает 34 буквы (табл. 1) [1, 3]. Каждая буква имеет четыре варианта написания: изолированный, начальный, срединный и конечный. При подготовке данных буква «و» была исключена ввиду её полного сходства с «وو», которые могут быть корректно различены средствами сегментации.

Развитие оптического распознавания текста для курдского письма сорани осложняется тремя ключевыми факторами:

- Недостаток лингвистических корпусов и обучающих данных.
- Отсутствие единых стандартов письма среди субдиалектов до недавнего времени.

Историко-политические обстоятельства. Многолетний запрет на использование курдского языка в ряде регионов привёл к ограниченности письменного наследия и отсутствию широких архивов.

Таблица 1

Центральнокурдский алфавит – формы букв

№	Буква	Начальная	Центральная	Конечная	№	Буква	Начальная	Центральная	Конечная
1	ئ	ئـ	ئـ	ئـ	18	غ	غـ	غـ	غـ
2	ا	اـ	اـ	اـ	19	ف	فـ	فـ	فـ
3	ب	بـ	بـ	بـ	20	ڤ	ڤـ	ڤـ	ڤـ
4	پ	پـ	پـ	پـ	21	ق	قـ	قـ	قـ
5	ت	تـ	تـ	تـ	22	ک	کـ	کـ	کـ
6	ج	جـ	جـ	جـ	23	گ	گـ	گـ	گـ
7	چ	چـ	چـ	چـ	24	ل	لـ	لـ	لـ
8	ح	حـ	حـ	حـ	25	ل	لـ	لـ	لـ
9	خ	خـ	خـ	خـ	26	م	مـ	مـ	مـ
10	د	دـ	دـ	دـ	27	ن	نـ	نـ	نـ
11	ر	رـ	رـ	رـ	28	هـ	هـ	هـ	هـ
12	ڕ	ڕـ	ڕـ	ڕـ	29	و	وـ	وـ	وـ
13	ز	زـ	زـ	زـ	30	ۆ	ۆـ	ۆـ	ۆـ
14	ژ	ژـ	ژـ	ژـ	31	ی	یـ	یـ	یـ
15	س	سـ	سـ	سـ	32	ئ	ئـ	ئـ	ئـ
16	ش	شـ	شـ	شـ	33	ه	هـ	هـ	هـ
17	ع	عـ	عـ	عـ	34	وو	-	وو	وو

Методология

Этот раздел разделен на два подраздела: описание набора данных и метод и дизайн.

Набор данных

Для решения поставленных задач был использован корпус данных из 426 747 изображений, созданный преимущественно в рамках настоящего исследования и частично собранный из открытых источников, включая датасет R.M. Ahmed. В результате была сформирована выборка, включающая 116 классов символов, которые после процедуры нормализации были сокращены до 33 уникальных классов. Примеры из набора данных приведены на рис. 1.

Набор данных отличается высоким уровнем разнообразия:

- включает изображения с прозрачным и непрозрачным фоном;
- содержит тексты, выполненные во втором и третьем цветовых каналах;

- представлен более чем 900 различными шрифтами для каждого из 116 классов.



Рис. 1. Несколько примеров набора данных

Финальная структура корпуса представлена в виде трёх подмножеств:

- 1) обучающая (train): 308,325 изображений;
- 2) валидационная (val): 54,410 изображений;
- 3) тестовая (test): 64,012 изображений.

Метод и архитектура модели

Разработанная сверточная нейронная сеть (CNN) предназначена для распознавания символов курдского языка (сорани). Архитектура включает четыре сверточных блока (табл. 2), каждый из которых содержит два слоя Conv2D (3×33/times 33×3) с активацией ReLU, пакетную нормализацию и слой MaxPooling2D. Для регуляризации применяются слои Dropout с различной вероятностью отключения нейронов (от 0,15 до 0,55).

Таблица 2

Архитектура сверточной нейронной сети для распознавания курдских символов

Слой (тип)	Размер выходных данных	Кол-во параметров
Conv2D (32 фильтра, 3×3)	(32, 32, 32)	320
Batch Normalization	(32, 32, 32)	128
Conv2D (32 фильтра, 3×3)	(32, 32, 32)	9 248
Batch Normalization	(32, 32, 32)	128
MaxPooling2D (2×2)	(16, 16, 32)	0
Dropout (0.15)	(16, 16, 32)	0
Conv2D (64 фильтра, 3×3)	(16, 16, 64)	18 496
Batch Normalization	(16, 16, 64)	256
Conv2D (64 фильтра, 3×3)	(16, 16, 64)	36 928
Batch Normalization	(16, 16, 64)	256
MaxPooling2D (2×2)	(8, 8, 64)	0
Dropout (0.55)	(8, 8, 64)	0
Conv2D (128 фильтров, 3×3)	(8, 8, 128)	73 856
Batch Normalization	(8, 8, 128)	512
Conv2D (128 фильтров, 3×3)	(8, 8, 128)	147 584
Batch Normalization	(8, 8, 128)	512
MaxPooling2D (2×2)	(4, 4, 128)	0
Dropout (0.40)	(4, 4, 128)	0
Conv2D (256 фильтров, 3×3)	(4, 4, 256)	295 168
Batch Normalization	(4, 4, 256)	1 024
MaxPooling2D (2×2)	(2, 2, 256)	0
Dropout (0.40)	(2, 2, 256)	0
GlobalAveragePooling2D	(256)	0
Dense (256, ReLU)	(256)	65 792
Dropout (0.30)	(256)	0
Dense (33, Softmax)	(33)	8 481

После сверточных блоков используется слой GlobalAveragePooling2D, преобразующий карты признаков в одномерный вектор. Финальная часть

сети состоит из двух полносвязных слоёв: Dense (256, ReLU) и классификатора Dense (33, Softmax). Дополнительно применяется Dropout (0,3–0,5), что снижает переобучение.

Особенности модели: сочетание GlobalAveragePooling2D и Flatten, использование дополнительного полносвязного блока (512 нейронов), а также варьируемых коэффициентов Dropout, что обеспечивает устойчивость к переобучению и высокую точность классификации.

Характеристики модели:

- всего параметров: 658,689 ($\approx 2,51$ MB)
- обучаемых параметров: 657,281 ($\approx 2,51$ MB)
- необучаемых параметров: 1 408 ($\approx 5,5$ KB)

Обучение модели и результаты

Модель обучалась в течение 100 эпох с использованием оптимизатора Adam (начальная скорость обучения – 0,001) и функции потерь Sparse Categorical Cross-Entropy. Размер мини-пакета составил 32 изображения. Для предотвращения переобучения применялись механизмы сохранения лучших весов (Early Stopping и Model Checkpoint) по метрикам val accuracy и val loss.

Рисунки 2 и 3 демонстрируют графики обучения модели, где четко видна стабильная конвергенция без признаков переобучения. График точности (см. рис. 2) показывает быстрый рост accuracy с ~ 53 до 95% в первых 5 эпохах, после чего наблюдается плавное улучшение до 97,6%. Важно отметить, что кривые обучающей и валидационной выборок практически совпадают, что свидетельствует о хорошей генерализации модели. График функции потерь (см. рис. 3) подтверждает эффективность обучения: training loss снижается с 1,6 до 0,13, а validation loss стабилизируется на уровне 0,08, что указывает на отсутствие переобучения.

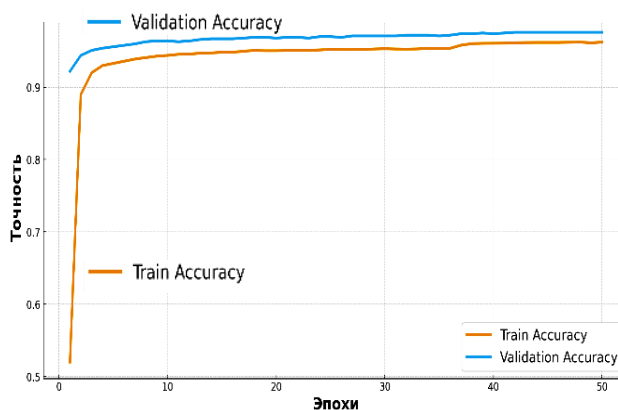


Рис. 2. Точность (Accuracy) по эпохам, модель быстро растёт до $\sim 0,976$ на валидации

В процессе обучения наблюдалась устойчивая динамика улучшения: уже на 5-й эпохе достигнута точность на валидационной выборке 95,4%, а на 10-й эпохе – 96,36%, к 40-й эпохе модель превысила порог 97,5%, на 50-й эпохе получена финальная точность 97,6% на тестовой выборке. Оценка на тестовых данных (170 720 изображений): средняя точ-

ность: 97,28%; средние значения метрик: Precision – 0,975; Recall – 0,970; F1-score – 0,973.

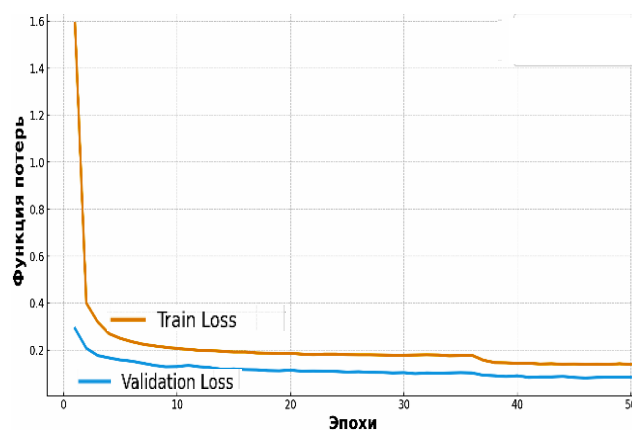


Рис. 3. Функция потерь (Loss) по эпохам, снижение на валидации достигает $\sim 0,08$

Большинство символов достигли точности свыше 96–99%, включая «ش», «س», «ا» и «ه». Наибольшие трудности модель испытала при распознавании близких по форме букв «ف» однако и здесь F1-score составил не менее 0,94.

Для наглядной иллюстрации работы модели на рис. 4 представлены примеры корректных классификаций символов с высокой уверенностью (98–100%), а на рис. 5 – нормализованная матрица ошибок, демонстрирующая распределение правильных и ошибочных предсказаний по всем классам. Как видно, большинство значений сосредоточено на диагонали, что подтверждает высокую точность классификации. Дополнительно в табл. 3 приведены результаты классификации по архитектурам моделей, включающей сверточные блоки, слои нормализации, подвыборки, dropout и полносвязные слои, с общим числом параметров 693 026 (2,64 MB), из которых 691 618 являются обучаемыми.



Рис. 4. Примеры классификации символов

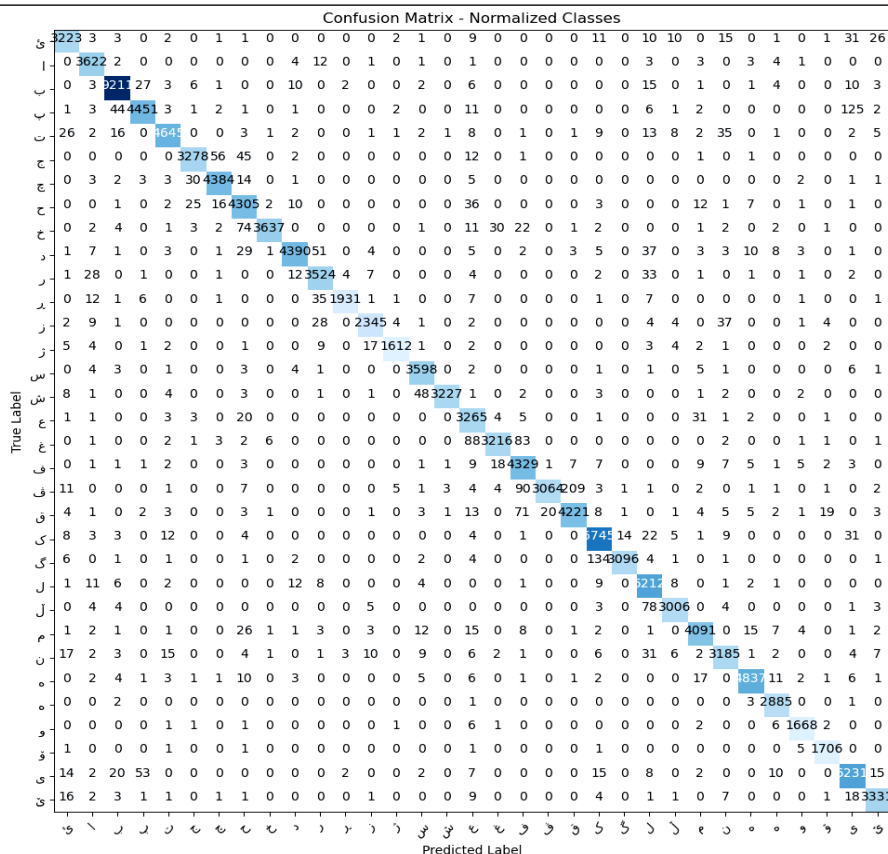


Рис. 5. Матрица ошибок модели

Таблица 3
Результаты классификации по каждому символу
курдского алфавита

Символ	Precision	Recall	F1-score	Support
ئ	0,97	0,96	0,96	3350
ا	0,98	0,99	0,99	3657
ب	0,99	0,99	0,99	9305
پ	0,98	0,96	0,97	4656
ت	0,97	0,97	0,97	4785
ج	0,98	0,97	0,97	3396
چ	0,98	0,98	0,98	4449
ح	0,95	0,98	0,96	4422
ه	0,99	0,97	0,98	3796
د	0,98	0,97	0,97	4568
ر	0,96	0,97	0,97	3622
ڕ	1,00	0,96	0,98	2005
ز	0,98	0,95	0,97	2442
ژ	0,99	0,97	0,98	1666
س	0,96	0,99	0,97	3631
ش	1,00	0,98	0,99	3304
ع	0,97	0,97	0,97	3338
ه	0,98	0,94	0,96	3407
ف	0,94	0,97	0,96	4413
ڤ	0,96	0,92	0,94	3411
ڤ	0,94	0,97	0,96	4393
ک	0,97	0,98	0,98	6862
گ	0,99	0,96	0,98	3254
ل	0,95	0,99	0,97	5278
ل	0,98	0,97	0,97	3108
م	0,99	0,97	0,98	4198
ن	0,96	0,96	0,96	3318
ه/ه	0,99	0,99	0,99	4915
ه	0,99	1,00	0,99	2892
و	0,98	0,99	0,98	1689
ز	0,98	0,99	0,99	1716
ی	0,95	0,97	0,96	5381
ئ	0,99	0,97	0,98	3398

Таким образом, разработанная CNN-модель показала высокую эффективность при распознавании курдских символов, что подтверждает её применимость для задач OCR в условиях ограниченных ресурсов.

Заклучение

В ходе проведённого исследования была разработана и протестирована свёрточная нейронная сеть для распознавания символов курдского языка (сорани). Модель обучалась на корпусе из 426,747 изображений, включающем 116 различных форм, нормализованных до 33 уникальных классов. Эксперименты показали высокую точность классификации, достигшую 97,28%, что подтверждает эффективность предложенного подхода и его применимость для задач OCR в условиях ограниченных цифровых ресурсов.

Полученные результаты демонстрируют, что даже архитектуры с относительно небольшой глубиной (четыре свёрточных блока) могут достигать значимых показателей при условии корректной подготовки данных и балансировки классов. Вместе с тем выявлено, что применение различных методов предварительной обработки оказывает существенное влияние на итоговую скорость и качество распознавания. Это указывает на необходимость разработки специализированных стратегий препроцессинга для повышения устойчивости классификатора рукописных данных, а также в исследовании постобработки предсказаний. Эти направления определяют вектор будущих исследований. Несмотря на до-

стигнутые успехи, анализ ошибок показал наличие трудностей при различении визуально близких символов. Решение данной проблемы видится в интеграции методов дополнительной нормализации, расширении корпуса.

Литература

1. Idrees S. Exploiting script similarities to compensate for the large amount of data in training tesseract LSTM: towards kurdish OCR / S. Idrees, H. Hassani // Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Data Mining. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 245–258.
2. Yaseen R. Kurdish optical character recognition / R. Yaseen, H. Hassani // UKH Journal of Science and Engineering. – 2018. – Vol. 2, No. 1. – P. 18–27.
3. Tofiq T. A. Kurdish text segmentation using projection-based approaches / T.A. Tofiq, J.A. Hussein // UHD Journal of Science and Technology. – 2021. – Vol. 5, No. 1. – P. 56–65.
4. Ahmed R.M. Kurdish handwritten character recognition using deep learning techniques / R.M. Ahmed, K.S. Mo-

ammed, A.H. Ali, B.N. Dhannoon // Neural Computing and Applications. – 2022. – Vol. 34, No. 46. – P. 119278.

5. Zarro R.D. Recognition-based online kurdish character recognition using hidden markov model and harmony search / R.D. Zarro, H.A. Anwer, A.S. Abdullah // International Journal of Technology. – 2017. – Vol. 20, No 2. – P. 783–794.

Зебари Хива Фахир Абдулхалек

Аспирант каф. БИС

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: hiwakurdy1997@gmail.com

Костюченко Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент, и.о. зав. каф. БИС ТУСУРа,
ORCID ID: 0000-0001-8000-2716
Эл. почта: key@fb.tusur.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 9

ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Окс Ефим Михайлович, зав. каф. физики, проф., д.т.н.

К.С. Ларин, И.Ю. Бакеев Моделирование процессов генерации плазмы в тлеющем разряде с полым катодом	17
Л.Ж. Нгон А Кики, Ф.А. Суховольский, В.А. Бурдовицин О взаимосвязи между параметрами эмиссионной плазмы и электрической прочностью ускоряющего промежутка плазменного электронного источника	20
А.С. Климов, Ж.Э. Дагри, А.В. Долгова Обработка полимеров с использованием пучковой плазмы в диапазоне давлений 0,1–10 Па	23
А.В. Долгова, А.А. Зенин Влияние параметров электронного пучка на размеры области расплава	26
А.В. Казаков, Н.А. Панченко, В.Е. Аркатов Калориметрическая оценка потерь энергии импульсного электронного пучка большого радиуса при транспортировке в форвакуумной области давлений	29
Т.О. Клишкин, А.С. Климов, С.А. Ендурев О влиянии давления газа на нагрев непроводящих и проводящих материалов при их электронно-лучевой обработке	33
В.Е. Аркатов, А.В. Казаков, Н.А. Панченко Исследование эмиссии электронов в форвакуумном импульсном плазменном источнике электронов с разрядной системой на основе планарного магнетрона	36
С.В. Гавриш, А.О. Потапенко, П.А. Чиликина Алгоритм расчета толщины стенки разрядной оболочки импульсной ксеноновой лампы	40
М.В. Шандриков, А.С. Бугаев, А.А. Черкасов Влияние потенциала экспандера на ионный ток и масс-зарядовый состав ионов плазмы магнетронного разряда	44

Секция 10

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Председатели – Буриков Николай Иванович, и.о. зав. каф. ЭП, д.ф.-м.н.;

Акрестина Анна Сергеевна, доцент каф. ЭП, к.ф.-м.н.

В.Н. Давыдов, А.В. Цыкалова Инжекция носителей заряда в светодиодной гетероструктуре	49
Ф.Н. Хайруллин, В.А. Ивасенко, И.Н. Кореньков, С.С. Булатов, Р.И. Анисимов, А.А. Колмаков Термодиффузионное легирование ниобата лития медью, нанесенной методом химического осаждения	52

Секция 11

ОРГАНИЧЕСКАЯ И НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Председатель – Туев Василий Иванович, зав. каф. РЭТЭМ, проф., д.т.н.

А.Е. Голых, Д.В. Фомин Разработка тепловакуумной камеры, оборудованной имитатором солнечного света для испытаний МКА	57
С.В. Поздняков, С.В. Макаров, М.А. Санджиева Исследование динамики носителей заряда в тонких композитных пленках на основе квази-2Д перовскита $(\text{BA})_2(\text{MA})_{x-1}\text{Pb}_x\text{Br}_{3x+1}$	60
Д.А. Алмаев, В.В. Копьев, А.В. Цымбалов Влияние межэлектродного расстояния на фотоэлектрические характеристики фотоприемников на основе оксида галлия	64

И.А. Благих, К.Д. Франк, Д.А. Жаворонков	
Обзор люминофорных композиций для аэрозольного нанесения на светодиодные чипы	67
А.Э. Грицай, Р.Э. Грицай, Д.О. Петров, И.Ф. Гарипов	
Проведение испытаний миниатюрных полупроводниковых ламп в высокотемпературных режимах	70
А.Д. Гончаров, Д.О. Печникова	
Методика расчета светотехнических характеристик линейных профильных световых и облучательных приборов	72
А.В. Пономарева, Н.А. Репников	
Функциональные полимерные и композитные материалы как основа технологий гибкой и печатной электроники	76
В.Н. Давыдов, В.С. Сафонова, З.А. Зенкин	
Блок температурных испытаний элементов оптоэлектроники на элементах Пельтье	79
В.Н. Давыдов, В.С. Сафонова	
Восстановление частотных свойств фотопроводимости поликристаллического CdSe	82
П.В. Шачнева, С.Б. Туранов	
Перспективы применения динамического освещения в офисной среде	85
Д.К. Шурикова, В.И. Копытова, Н.В. Краморенко, Е.Г. Незнамова	
Влияние освещения на развитие водяного гиацинта	88
В.И. Туев, К.Д. Иконникова	
Частотный анализ устройства защиты электросети от перепада напряжения	91
Е.А. Чемоданова, В.С. Якунина, А.О. Лазарева, В.С. Солдаткин	
Влияние спектрального состава ФАР на начальные этапы онтогенеза и морфометрические показатели льна масличного	93

Секция 12

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

*Председатели – Шурыгин Юрий Алексеевич, директор департамента управления и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, проф., д.т.н.;
Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, доцент, к.т.н.*

А.Е. Карелин, Д.Е. Болбуков	
Перспективы применения систем ЧПУ для автоматизации изготовления кабельных жгутов	99
П.И. Андреев, Д.П. Долгополов, Е.А. Нетесова, Ю.О. Лобода	
Электромиография: принципы, проблемы и применение в робототехнике	103
Д.П. Ефимов, С.А. Юренская	
Использование искрового генератора в борьбе с беспилотными летательными аппаратами	106
Е.С. Глибин, А.В. Прядилов, Е.Д. Денисова, Л.И. Буйлов	
Применение метода электромеханических аналогий при моделировании работы сейсмоисточника в SimInTech	108
А.К. Городилов, Е.С. Шандаров	
Асинхронная модель управления человекоподобным роботом	110
А.А. Радкевич, С.А. Павлюковец	
Адаптивный алгоритм управления для минимизации вибраций при управлении мобильной платформой с колёсами механум	112
Д.Ф. Плещев, А.В. Федотов, Ю.О. Лобода, М.Е. Антипин	
Создание нейроинтерфейса управления роботом-помощником для людей с ограниченными возможностями	115
И.Д. Кречетова, Ю.Н. Михайлова, Е.С. Шандаров	
Модель управления человекоподобным роботом для игры в футбол	118
А.Н. Белозерова, А.В. Крюков	
Пневматическая система подачи двухкомпонентного состава для роботизированных установок	121
Р.А. Корчагин, С.М. Губин, Е.С. Шандаров	
Дистанционная система управления роботом на базе микроконтроллера ESP-32 и Arduino	123

Секция 13

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Председатель – *Кориков Анатолий Михайлович, проф. каф. АСУ, д.т.н.*

А.П. Белошицкий, Т.В. Ганджа Сравнительный анализ библиотек с открытым исходным кодом для интеграции метода конечных элементов в отечественную систему компьютерного моделирования MAPC	129
О.М. Субботина, М.Е. Туманов, А.С. Садкова, А.Е. Боровская Серверные компоненты React: новые возможности для автоматизации и оптимизации систем управления	132
Д.А. Дашкевич, А.Е. Карелин Применение методов аугментации данных для повышения точности идентификации зернистых сыпучих материалов	135
И.С. Федорцов Проблематика и постановка задачи разработки программного модуля для автоматизированной инвентаризации лесов на основе анализа изображений	138
А.М. Исаков, С.С. Астрелина, А.И. Мелихов, А.Д. Передвижкин, В.Е. Сковпень Повышение академической вовлечённости студентов через цифровизацию образовательной среды: фокус на успеваемость	141
Д.В. Гуцол, Г.Р. Полтавец, Д.О. Ковалевский, А.В. Дегтярев Частотное управление беспроводного LCC-преобразователя для зарядки беспилотных аппаратов с использованием имитационного моделирования	143
Ю.А. Самойлов, А.А. Погодин, А.Д. Кузовлев Исследование речевых параметров в зависимости от возраста говорящего	146
В.Е. Заборонок, Е.А. Поломошнова, Р.С. Кульшин Применение неинвазивных нейроинтерфейсов для выявления лжи	148
Е.А. Прец Логическая модель серверного приложения интеграции информационных потоков данных в среде Apache Solr	151
И.В. Калиткин, Н.С. Репьюк Речевой корпус данных для изучения речи при постинсультной афазии	154
А.В. Щегляков, А.В. Убайчин, Т. Абдирасул уулу, П.П. Ишудченко Концепт универсального стенда автоматизированного контроля электрических параметров широкого спектра устройств	157
М.В. Свиридов, Е.И. Сафронова, Д.М. Плюхин, П.А. Куминов Реализация алгоритма подбора кандидатов в мобильном приложении для формирования IT-команд	161
П.А. Куминов, А.А. Захарова, Е.В. Телипенко Принципы разработки модели информационного обеспечения системы развития интеллектуально-инновационного потенциала кадров	163
А.М. Тернов Применение компьютерного зрения для автоматического выявления дефектов 3D-печати	166
Е. Замерчук, Е.Е. Халтурин, Д.А. Вычужанин, А.М. Исаков Современный рюкзак: новые технологии для организации и защиты студента	168
М.Е. Захаров, Т.В. Ганджа Применение компьютерного моделирования для усовершенствованного управления перекачивания углеводородного сырья с целью исключения гидроударов в трубопроводной системе	171
Р.М. Закирзянов Выбор параметров модифицированного алгоритма муравьиных колоний для оптимизации структуры автоматизированной системы управления крупным промышленным объектом	174
В.А. Курандин, Р.О. Хушкадамов, Н.В. Котюков Инновационный рюкзак	177
Д.Р. Белкова, М.А. Рудникович Технологии облачных вычислений в системном анализе: преимущества и риски	179

Секция 14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатели – Комнатнов Максим Евгеньевич, доцент каф. ТУ, к.т.н.;

Черникова Евгения Борисовна, доцент каф. СВЧМКР, к.т.н.

И.С. Кеда, О.А. Доценко

Электромагнитные характеристики композитов, содержащих многостенные углеродные нанотрубки 183

В.А. Фещуков, С.В. Смирнов, А.А. Квасников

Разработка прототипа программного модуля САПР для создания и взаимодействия с трехмерными геометрическими моделями 185

М.Е. Дорогов, В.В. Торопов, А.А. Иванов

Обзор библиотек для решения СЛАУ с разреженной матрицей в задачах на собственные значения 188

Н.О. Шаталов, А.К. Нестеренко, В.П. Костелецкий

Разработка антенного полотна для активной фазированной решетки 190

В.Д. Нгуен

Влияние асимметрии матриц погонных параметров асимметричной тестовой цепи электропитания на отклик на воздействие сверхкороткого импульса по корпусной земле 194

В.С. Чебанов, В.А. Семенюк

Методика применения дипольного приближения для излучаемой помехоэмиссии, измеренной методом поверхностного сканирования в ближней зоне 197

М.Д. Юсаф

Перекрестные наводки в двухпроводном модальном фильтре на двухсторонней печатной плате при воздействии электростатического разряда по схемной земле 201

Е. Зима

Применение пространственной декомпозиции для моделирования симметричных антенных решеток 203

К.С. Лукас, Т.Ф. Данг

Использование САПР для вычисления модуля напряженности электрического поля в ближней зоне проводных антенн 206

А.К. Томилин, И. Мисюченко, В.С. Викулин

Исследование электромагнитного поля тороида и обеспечение ЭМС радиоэлектронных систем 208

М.А. Ромашенко, А.В. Гудков

Экстракция паразитных параметров пассивных компонентов корректора коэффициента мощности 211

Секция 15

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕСПИЛОТНЫЕ СИСТЕМЫ

Председатель – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУР, проф., д.т.н.

П.Г. Букина, С.С. Харченко

Сравнение алгоритмов сопоставления паттернов ЧОТ в задаче определения психоэмоционального состояния по речевому сигналу 217

С.А. Литовкин, С.А. Давыденко

Классификация сгенерированной речи с использованием методов машинного обучения 220

А.Ю. Тимохович, А.И. Гуляев

Правовое регулирование средств криптографической защиты информации в Российской Федерации 222

М.Е. Исаева, П.Ю. Лаптев, Е.В. Николаева

Решение задачи сегментации фотографий новорождённых с помощью нейронной сети YOLO11 225

Д.В. Старосельцева, Р.В. Солоха, П.Ю. Лаптев

Интеллектуальная система по детектированию печатей в документах на основе свёрточных нейронных сетей 228

Д.С. Лазорин

Разработка и тестирование метода обнаружения трафика WireGuard в условиях применения средств обфускации 231

С.А. Давыденко, С.А. Литовкин

Методы совмещения результатов классификации на примере продлённой аутентификации 234

М.С. Фролова, М.А. Проневич, С.Д. Грищенко, Ю.О. Лобода Разработка универсальной системы сканирования на базе искусственного интеллекта	237
А.Д. Брагин, И.С. Мамонтов Модернизация алгоритмов нейросетевой генерации изображений для повышения качества и снижения потребления видеопамяти	240
Т.Д. Леоненко, А.К. Кемеров, А.В. Матафонов Модели жизненных циклов процессов разработки и эксплуатации программного обеспечения и угрозы безопасности	245
А.Я. Суханов, Н.Е. Тарабрин, Д.А. Мисиян Улучшение точности автоматической разметки телерентгенограмм с помощью современных методов глубокого обучения	248
И. Мухамад Энергоэффективная оптимизация траекторий БПЛА с учётом влияния ветра	251
А.К. Новохрёстов, С.В. Чиндин, А.А. Занько, Н.Г. Праскурин Модель угроз аутентичности на сетевом и логическом уровнях представления компьютерных сетей	255
А.К. Новохрёстов, М.А. Быстров, А.А. Занько, В.Н. Репников Модель угроз аутентичности на физическом уровне представления компьютерных сетей	259
А.А. Олифиренко Адаптивная калибровка порога аномальности в Isolation Forest для предотвращения атак отравления данных в федеративном обучении	262
Е.П. Орловский, А.А. Шелупанов Графовые нейронные сети для идентификации по динамике нажатий клавиш	265
И.В. Трусов, В.Г. Крючков, С.Е. Малиновский, С.А. Пашкевич Исследование и проектирование систем валидации генераторов сетевого трафика и оборудования	268
К.Г. Пономарёв, Е.А. Верещагина Применение метрики Вассерштейна в генеративно-сопоставительных сетях для повышения качества выявления голосовых дипфейков	271
Е.А. Прозорова Идентификация пользователей по термограмме лица с применением Сиамской нейронной сети	274
М.А. Ромашенко, С.Н. Паршин, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов Анализ данных телеметрии БПЛА с помощью нейронной сети для повышения помехоустойчивости радиоканала управления	277
Е.А. Деркач, А.А. Шелупанов Прототип комплексной методики оценки нулевого доверия	281
Д.А. Баранов, А.А. Конев, А.А. Шелупанов Оценка схем групповой аутентификации роя БПЛА в сетях FANET	284
Д.С. Гекк, А.О. Терехин Моделирование системы массового обслуживания шифраторов в сети квантового распределения ключей с учётом переменной скорости их генерации	287
С.А. Пашкевич, К.И. Цимбалов, В.Г. Крючков, С.Е. Малиновский, И.В. Трусов Обзор программных и программно-аппаратных комплексов для генерации сетевого трафика	290
М.В. Ёрхов, В.А. Фаерман Исследование протокола согласования ключей в системах квантового распределения ключей на основе TRM-нейросетей	292
Х.Ф.А. Зебари, Е.Ю. Костюченко Разработка OCR-системы для центральнокурдского языка на базе глубокого обучения	296

Научное издание

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

XXI Международная научно-практическая конференция

26–28 ноября 2025 г.

Материалы докладов

В трех частях

Часть 2

Electronic Devices and Control Systems
XVIII International Scientific-practical Conference
November 26–28, 2025
Part 2

Верстка В.М. Бочкаревой
Корректор В.Г. Лихачева

Сдано на верстку 25.10.2024. Подписано к печати 01.12.2025.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная. Печ. л. 19,1
Тираж 100 экз. Заказ 6.

Издано ТУСУР (заказчик)
г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, ГК, т. (382-2) 70-15-24
Тираж отпечатан в издательстве ТУСУРа
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Ред.-изд. подготовка оригинал-макета в эл. виде
В-Спектр (ИП Бочкарева В.М., исполнитель)
ИНН 701701817754
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24,
тел. 8-905-089-92-40, эл. почта: bvm-1@list.ru