

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

XVII Международная научно-практическая конференция

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

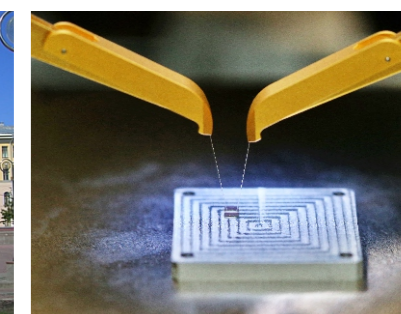
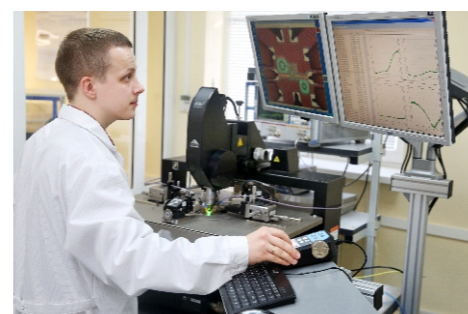
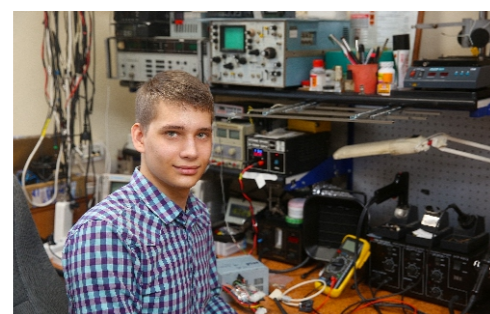
Материалы докладов

г. Томск

17–19 ноября 2021 г.

В двух частях

**ЧАСТЬ 2**



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

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

XVII Международная научно-практическая конференция

**17–19 ноября 2021 г.**

**Материалы докладов**

**В двух частях**

**Часть 2**

В-Спектр  
Томск – 2021

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

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2021. – 352 с.

**Electronic Devices and Control Systems: XVII International Scientific-practical Conference (November 17–19, 2021).** – Part 2. – Tomsk: V-Spektr, 2021. – 352 p.

ISBN 978-5-91191-464-6  
ISBN 978-5-91191-465-3 (Ч. 1)  
ISBN 978-5-91191-466-0 (Ч. 2)

Часть 1 – 2–12, 22 секции.  
Часть 2 – 13–21, 24 секции.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XVII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 18–20 ноября 2021 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника 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; системы и устройства микроволновой радиофотоники; органическая и неорганическая полупроводниковая светотехника; электромагнитная совместимость; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение; робототехника и мехатроника; проектирование и разработка веб-систем и мобильных приложений; электронное государство: предпринимательство и административное управление; Results of Postgraduate and Master Students' Research in the Sphere of Electronics and Control Systems (секция на английском языке).

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

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

**Генеральный спонсор конференции:**

АО «ПКК «Миландр»



**Спонсоры конференции:**

ООО «Кейсайт Текнолоджиз»



ООО «Научные приборы и системы»



ООО «50OHM TEX.»



**Медиапартнёр:**

Научно-технический журнал  
«Информация и космос»



ISBN 978-5-91191-464-6  
ISBN 978-5-91191-466-0 (Ч. 2)

© ТУСУР, 2021

## ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – АО «ПКК МИЛАНДР»

**МИЛАНДР**АО «ПКК Миландр»  
124498, г. Москва, Зеленоград,  
Георгиевский проспект, д. 5Тел.: 495 981 5433  
Факс: 495 981 5436  
www.milandr.ru

АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) является одним из ведущих предприятий радиоэлектронного комплекса России. Основная специализация компании – реализация проектов в области разработки и производства изделий микроэлектроники (микроконтроллеры, микропроцессоры, микросхемы памяти, микросхемы приемопередатчиков, микросхемы преобразователей напряжения, радиочастотные схемы), универсальных электронных модулей и приборов промышленного и коммерческого назначения, разработки программного обеспечения для современных информационных систем и изделий микроэлектроники.

Отличительная особенность предприятия – это обеспечение создания интегральных микросхем и электронных модулей от процессов проектирования и производства инновационных продуктов, востребованных рынком, до постоянного технического сопровождения всех реализованных проектов.

В течение последних десяти лет «Миландром» выполнено 242 опытно-конструкторские работы в интересах аппаратурных промышленных предприятий. Разработано и доведено до серийного выпуска 187 типонаименований интегральных микросхем.

Основными потребителями изделий под маркой «Миландр» являются российские приборостроительные предприятия-изготовители аппаратуры связи, радиотехнических систем, бортовых вычислителей и систем телеметрии.

«Миландр» имеет свои представительства в городах: Москва, Воронеж, Нижний Новгород, Санкт-Петербург.

Офисные и производственные помещения, занимаемые компанией, составляют свыше 22 000 м<sup>2</sup>, включая 1 260 м<sup>2</sup> чистых производственных помещений.

В коллективе компании работают 650 высококвалифицированных специалистов, включая 22 кандидатов наук и 2 докторов наук.

Система менеджмента качества предприятия соответствует требованиям ГОСТ ISO 9001–2011 и распространяется на разработку и производство интегральных микросхем; пьезоэлектрических приборов и электромеханических фильтров, металлокерамических корпусов интегральных микросхем, многокристалльных модулей и микросборок, источников вторичного электропитания и радиоэлектронной аппаратуры.

В 2014 году АО «ПКК Миландр» совместно с Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) и Томским государственным архитектурно-строительным университетом (ТГАСУ) одержали победу в конкурсе по созданию высокотехнологичного производства интеллектуальных приборов энергетического учета, разработанных и изготовленных на базе отечественных микроэлектронных компонентов, и гетерогенной автоматизированной системы мониторинга потребляемых энергоресурсов на их основе, выполняемом по Постановлению Правительства Российской Федерации № 218. Для выполнения работ по комплексному проекту АО «ПКК Миландр» и ТУСУР открыли Центр системного проектирования. В Центре системного проектирования (ЦСП ТУСУР), созданном на базе ТУСУР, разрабатывается программное обеспечение для интеллектуальных приборов энергоучета и комплексной системы автоматизированного сбора и обработки информации. Результаты работ Центра системного проектирования будут не только внедряться в производство, но и активно использоваться в учебном процессе ТУСУР. Широкое внедрение совместных разработок АО «ПКК Миландр», ТУСУР и ТГАСУ позволит снизить затраты населения за тепло и электроэнергию на 15–20%.

Также АО «ПКК Миландр» активно проводит различные программы по взаимодействию с вузами: предоставляет вузам оборудование собственного производства и методические пособия для проведения практических занятий на все время сотрудничества. По окончании курсов проводится аттестация студентов, по результатам которой самые выдающиеся студенты получают сертифика-

ты. Проект реализуется под эгидой импортозамещения, позволяет студентам российских вузов приобрести навыки работы с отечественной элементной базой и иметь преимущество при трудоустройстве в ведущие приборостроительные предприятия России.

Суммарно компанией передано на безвозмездной основе 20 различных отладочных комплектов. Оборудование используется на трех кафедрах:

- компьютерные системы в управлении и проектировании (КСУП);
- телекоммуникации и основы радиотехники (ТОР);
- комплексная информационная безопасность электронно-вычислительных систем (КИБЭВС).

Начиная с 2014 года компания является партнёром по развитию ТУСУРа и выступает ежегодным генеральным спонсором научно-практических конференций для студентов, аспирантов и молодых ученых: Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» и «Научная сессия ТУСУР». В ходе работы секций регулярно представлены результаты исследований по ряду фундаментальных проблем, а также представлены результаты проектов, выполняемых по грантам, федеральной целевой программе «Исследования и разработки» и в рамках постановления Правительства РФ № 218.

В 2016 году в ТУСУРе создана базовая кафедра микроэлектроники, информационных технологий и управляющих систем» (МИТУС) с применением дистанционного обучения, которая сможет решать приоритетные задачи по интеграции образования и науки в производство. Компания нацелена на то, чтобы выпускники кафедры стали незаменимыми сотрудниками различных предприятий радиоэлектронной промышленности и были востребованными специалистами на современном рынке труда. Для этого АО «ПКК Миландр» предоставил своей кафедре самую актуальную материально-методическую базу и обеспечил другими возможными ресурсами компании.

*Генеральный директор АО «ПКК Миландр» – Павлюк Михаил Ильич*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «KEYSIGHT TECHNOLOGIES»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Россия, 115054, г. Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: 495 797 39 00  
Факс: 495 797 39 02  
www.keysight.ru

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

В 2019 году Keysight отмечал сразу 3 важные даты: 80 лет с момента основания в 1939 г. Б. Хьюлеттом и Д. Паккардом направления электронных измерений, 50 лет непрерывного сотрудничества и инноваций в России, 5 лет работы под новым именем! Построенная на фундаменте прошлых достижений, компания подтверждает все свои обязательства перед заказчиками – как в области дальнейшего развития измерительных технологий и приверженности высочайшему качеству продукции, так и в области гарантийного и сервисного обслуживания.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр контрольно-измерительных решений, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, генераторы импульсов, системы сбора данных, источники питания, логические анализаторы), решения для проектирования и моделирования (в том числе решения для автоматизации разработки электронных устройств, решения для проектирования высокочастотных/смешанных интегральных схем, решения для электромагнитного моделирования пассивных трехмерных структур произвольной формы, решения для моделирования антенн и пр.), решения для тестирования в области телекоммуникаций, электроэнергетики, автомобилестроения и отрасли Интернета вещей.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard/Agilent Technologies, используются уже более 50 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших клиентов Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

Большое внимание Keysight Technologies уделяет работе с высшими учебными заведениями по всему миру. За время своего существования компания накопила большой опыт успешного сотрудничества с академическим сообществом и предлагает высокотехнологичные и доступные решения для учебных лабораторий, совместные научно-технические мероприятия, методические и учебные материалы и профессиональные стажировки для студентов и молодых специалистов.

Самое современное оборудование и инновационные образовательные инициативы Keysight Technologies позволяют готовить высококвалифицированных профессионалов. Возможность учиться и работать с использованием новейшего оборудования и программного обеспечения является серьезным мотивирующим фактором и стимулирует интерес студентов к инженерной работе и научным исследованиям.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: [www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз» – Смирнова Галина Владимировна*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ГРУППА КОМПАНИЙ «НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ»



Группа компаний «Научное оборудование»  
630090, Россия, г. Новосибирск,  
ул. Николаева 11/5

Тел.: (383) 330 8295  
sales@spegroup.ru  
www.spegroup.ru

Группа компаний «Научное оборудование» была образована в 1999 году. Основное направление деятельности компании – снабжение высокотехнологичным оборудованием учебных, научно-исследовательских и промышленных предприятий Сибири и Дальнего Востока России.

Мы анализируем задачи заказчика, подбираем оборудование под каждый конкретный случай, осуществляем поставку оборудования, а также оказываем технологическую и методологическую поддержку, гарантийный и послегарантийный ремонт. Некоторые наши заказчики доверяют нам полное закрытие всех потребностей своих лабораторий и в оборудовании, и в расходных материалах.

В штате компании состоят высококвалифицированные технические специалисты с собственным опытом научной работы. Наши специалисты регулярно знакомятся с новинками оборудования, с новыми подходами в приборостроении, посещают международные выставки и обучающие семинары от производителей. Для каждой задачи заказчика мы можем предложить самое современное решение. Существующие рабочие связи со многими лабораториями СО РАН позволяют оперативно привлекать к решению задач заказчика профильных научных специалистов. Кроме того, мы сами организуем мастер-классы и семинары, на которых наши заказчики имеют уникальную возможность познакомиться с новейшим оборудованием для решения своих задач.

У нас налажены партнерские отношения со многими ведущими мировыми производителями научного и технологического оборудования как в России, так и за рубежом. У компании есть свой инженерный департамент; в случае необходимости мы можем самостоятельно разработать решение непосредственно под задачу заказчика.

Нашими заказчиками являются все академические институты Сибирского отделения Российской академии наук, многие промышленные предприятия, технологические компании, учебные заведения высшего образования Сибирского и Дальневосточного регионов.

Кроме деятельности по поставке и разработке оборудования, мы участвуем в продвижении разработок институтов СО РАН на внешний рынок, организуем совместные проекты институтов СО РАН с разными организациями по разработке конкретных технологических и наукоёмких решений.

Компания «Научные приборы и системы» строго следует закону и считает недопустимыми какие-либо компромиссы в правовом аспекте – вся деятельность компании основана на соблюдении требований как российского законодательства, так и законодательства стран деловых партнеров.

Своей миссией мы видим деятельное участие в поступательном развитии научно-технического потенциала Сибири и Дальнего Востока путём построения и реализации долгосрочных отношений с широким кругом партнёров и выстраивания сети, в рамках которой наши заказчики могут эффективно взаимодействовать, объединяя усилия для достижения общих результатов.

Группа компаний «Научное оборудование» существует уже более 20 лет. Сотрудничество с нами всегда продуктивно, комфортно и происходит в атмосфере взаимопонимания. У нас много амбициозных и долгосрочных задач, но прежде всего мы работаем над тем, чтобы задачи наших партнеров были решены самым простым и в то же время наилучшим образом.


Приглашаем к долгосрочному и взаимовыгодному сотрудничеству!

*Директор ООО «Научные приборы и системы» – Федоров Павел Леонидович*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «50ОМ ТЕХНОЛОДЖИЗ»

**50ohm Technologies**

ООО «50ом Технолоджиз»  
info@50ohm.tech  
<https://50ohm.tech/ru>  
634045, г. Томск

Тел.: +7-923-408-0408  
Факс: 50ohmTechRus  
 company/50ohm-technologies-llc

**Компания 50ohm Technologies разрабатывает программное обеспечение для автоматизации измерений, построения моделей компонентов и проектирования ВЧ- и СВЧ-радиоэлектронных устройств.**

50ohm Technologies предлагает решения задач автоматизации рабочих процессов с учётом индивидуальных особенностей предприятия. Миссия компании – разрабатывать удобные, умные, интеллектуальные инструменты, которые помогают инженерам в области СВЧ-электроники быстро решать возникающие задачи.

Компания разрабатывает программные решения по направлениям:

- автоматизация измерений устройств электроники и радиоэлектроники;
- базы данных результатов измерений и их автоматическая обработка;
- автоматизация проектирования СВЧ-устройств;
- построение моделей электронных компонентов;
- подготовка научно-технической документации.

Компания обладает компетенциями в использовании методов искусственного интеллекта и экспертных систем. Внедрение данных технологий на предприятие позволяет перейти на качественно новый уровень и автоматизировать наиболее рутинные этапы бизнес-процессов.

50ohm Technologies предлагает услуги по разработке систем автоматизации измерений, реализуемых на основе оборудования заказчика. Использование готовых сценариев измерений конкретных компонентов и устройств в значительной степени сократит время тестирования и повысит эффективность измерений. 50ohm Technologies производит разработку решений автоматизированной генерации технической документации по типовым шаблонам – от оформления графиков до формирования готовых документов.

Компания обладает значительным опытом построения моделей пассивных и активных СВЧ-компонентов. Создание программного обеспечения на основе общепринятых и авторских методик в значительной степени упрощает и автоматизирует процесс построения моделей, уменьшая временные и финансовые затраты предприятия на данном этапе.

Наиболее сложным этапом в процессе проектирования СВЧ-устройства является получение схемотехнического и топологического решений. За годы научной работы коллектив получил успешный опыт разработки и использования программных модулей САПР, основанных на методах искусственного интеллекта. Такие программы позволяют получить целый набор решений, из которых разработчик может выбрать наиболее подходящее для дальнейшей реализации. Также компания занимается автоматизацией проектных операций в популярных коммерческих САПР СВЧ-устройств и интеграцией между ними.

*Директор ООО «50ом Технолоджиз» – Калентьев Алексей Анатольевич*





*Секция 13*

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ**

*Председатели секции – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, д-р техн. наук;  
Демаков Александр Витальевич, ассистент каф. ТУ, канд. техн. наук*



УДК 004.514

К.Е. Зиновьев, А.А. Квасников, А. Алхадж Хасан

## Графический интерфейс для расчёта характеристик антенн при проводно-сеточной аппроксимации в системе TALGAT

Разработан графический интерфейс пользователя программы расчёта антенн при проводно-сеточной аппроксимации в системе TALGAT. На примере биконической антенны показана его функциональность.

**Ключевые слова:** графический интерфейс, проводно-сеточная аппроксимация, антенна, TALGAT.

В процессе описания геометрии антенн в существующих системах автоматизированного проектирования (САПР) используется граничное представление трехмерных объектов, основанное на топологии и геометрии (поверхности, кривые и точки). Основными топологическими элементами при данном представлении являются вершины, ребра и грани. Задание геометрии антенны с помощью геометрических примитивов основано на взаимодействии пользователя САПР с ее графическим пользовательским интерфейсом. Для применения численного метода и вычисления параметров антенны на основе её разработанной геометрической модели производится создание сеточной модели и задание граничных условий моделирования.

В системе решения задач электромагнитной совместимости TALGAT [1] реализован модуль электродинамического анализа, реализующий тонкопроводящую аппроксимацию геометрии антенны и вычисление ее параметров (входной импеданс, характеристики излучения) с помощью метода моментов [2]. При этом для использования модуля пользователю требуется изучение внутреннего языка системы TALGAT\_Script. Для оптимизации процедуры расчета с помощью данного модуля требуется разработка нового графического пользовательского интерфейса с учетом особенностей проводно-сеточной аппроксимации моделей антенн. Цель работы – разработать графический интерфейс для расчёта характеристики антенн при проводно-сеточной аппроксимации.

Для разработки графического интерфейса использованы возможности языка программирования Python [3], а также его библиотек tkinter [4] и sys [5]. Библиотека tkinter предназначена для реализации элементов пользовательского интерфейса: кнопки ввода данных, заголовки текста, кнопки переключения состояния объекта и др. Библиотека sys обеспечивает доступ к переменным и функциям, взаимодействующим с интерпретатором Python, а также позволяет задавать и интерпретировать параметры среды для дальнейшего использования системой TALGAT. Данные библиотеки были выбраны из-за простоты их использования, доступности и наличия подробной документации.

В ходе работы создан графический интерфейс, выполненный в виде оконного приложения. Он содержит поля ввода основных параметров задания геометрии антенны, дискретизации её границ и источника возбуждения. Так, пользователю доступны

выбор рабочей частоты, радиуса проводов структуры, их начальные и конечные координаты и др. Далее приведены основные фрагменты интерфейса программы с указанием используемых классов библиотеки tkinter.

Окна ввода основных параметров геометрии структуры, а также других параметров, задание которых подразумевает ввод числовых данных с клавиатуры, реализованы с помощью элементов entry. Элементы класса label служат для обозначения переменных (рис. 1).

The number of already build wires: 0						Geometry	
X1	0	Y1	0	Z1	0		
X2	0	Y2	0	Z2	0		
Radius	0.007					Edit/Delete Wire	

Рис. 1. Поле ввода начальных координат проводов, из которых строится поверхность антенны

Основное окно программы также содержит элементы интерфейса для настройки шагов дискретизации (рис. 2). Так, реализован флаговый переключатель режимов дискретизации (ручной, автоматический) с помощью элемента класса radiobutton. При смене типа дискретизации элементы детальной настройки автоматического и ручного режимов становятся активными / неактивными соответственно.

**Segmentation**

Manual

subsections manual

Auto

On Wave

subsections minimal

Рис. 2. Фрагмент окна настройки дискретизации

Фрагмент окна настройки источника возбуждения показан на рис. 3. В окне реализован выбор типа возбуждения и его параметров. Элемент библиотеки checkbox используется для включения / выключения возбуждения на конкретном сегменте. Элементы radiobutton («Excitation», «Excitation subsection», «Excitation fixed») реализуют функционал переключения режима возбуждения.

Создано окно этапа постпроцессинга (рис. 4). Переход в соответствующий режим осуществляется по нажатию на элемент button основного окна программы. Так, пользователю доступен выбор методов

численного интегрирования из списка, реализованных в системе TALGAT. После выбора метода пользователю доступен выбор отображаемых результатов: вид структуры, поверхностные токи и диаграмма направленности. Переключение между режимами отображения результатов осуществляется с помощью взаимодействия с элементом интерфейса checkbox.

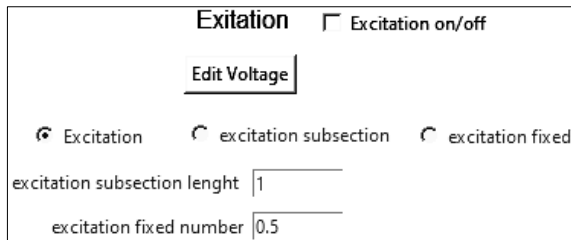


Рис. 3. Фрагмент окна настройки источника возбуждения

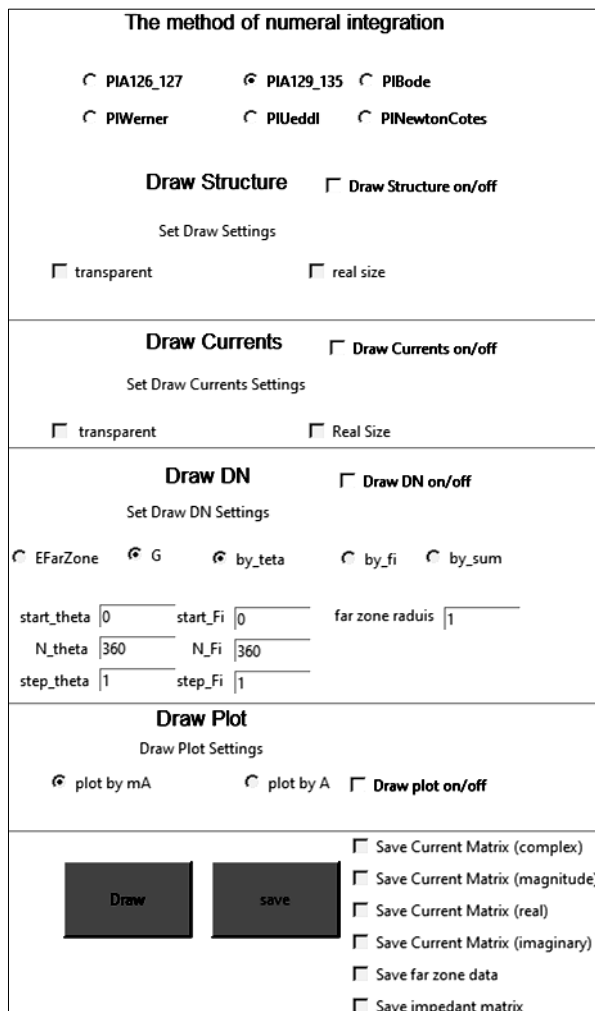


Рис. 4. Окно постпроцессинга

Для детальной настройки отображения пользователю доступны следующие параметры: прозрачность, использование реальных размеров, настройка отображения диаграммы направленности и пр. По нажатию на кнопку «Draw» происходит вызов функций системы TALGAT для отрисовки трехмерных изображений электрического поля и структуры. На рис. 5 показан пример диаграммы направленности

биконической антенны на частоте 500 МГц. Каждый конус антенны аппроксимирован 64 проводками. Дополнительно реализована выгрузка результатов вычислений (из списка доступных) в формате «.txt» по нажатию на кнопку «Save».

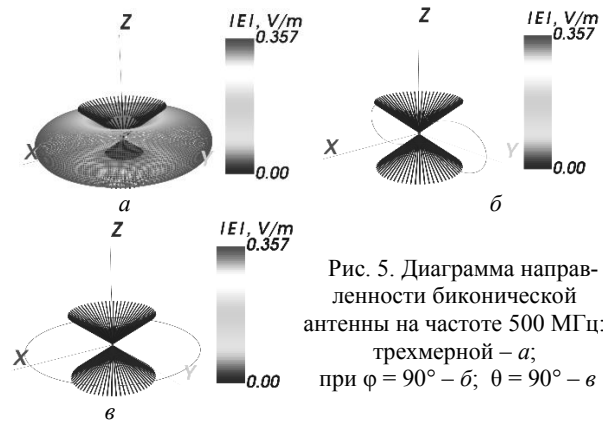


Рис. 5. Диаграмма направленности биконической антенны на частоте 500 МГц: трехмерной – а; при  $\varphi = 90^\circ - \beta$ ;  $\theta = 90^\circ - \alpha$

Отличительной особенностью программы является объединение интерфейса, разработанного на языке Python, со встроенными функциями системы TALGAT, реализованными на языке C++.

#### Заключение

Разработан графический пользовательский интерфейс для расчёта характеристик антенн при проводно-сеточной аппроксимации, позволяющий упростить процесс взаимодействия пользователя с системой TALGAT. В дальнейшем планируется расширение функциональных возможностей системы и совершенствование ее интерфейса.

#### Литература

1. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
2. Харрингтон Р.Ф. Применение матричных методов к задачам теории поля // Труды Института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1967. – № 2. – С. 5–19.
3. Python Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://python.org/doc/>, свободный (дата обращения: 01.09.2021).
4. tkinter – Python interface to Tcl/Tk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.python.org/3/library/tkinter.html>, свободный (дата обращения: 05.09.2021).
5. sys – System-specific parameters and functions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.python.org/3/library/sys.html>, свободный (дата обращения: 05.09.2021).

#### Зиновьев Константин Евгеньевич

Студент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Эл. почта: extremal932@gmail.com

#### Квасников Алексей Андреевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: aleksejkvasnikov@gmail.com

#### Алхадж Хасан Аднан

Аспирант каф ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: alhaj.hasan.adnan@yandex.ru

УДК 621.391.825

А.О. Белоусов, В.О. Гордеева

## Оптимизация модального фильтра с лицевой связью по алгоритму эволюционных стратегий с ограничениями

Рассматривается оптимизация модального фильтра с лицевой связью по алгоритму эволюционных стратегий с установлением ограничений. Под ограничениями понимается задание диапазонов значений изменения геометрических параметров модального фильтра. Продемонстрирована работоспособность этого алгоритма и показаны его основные достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** оптимизация, эволюционные стратегии, модальный фильтр, эволюционные алгоритмы, сверхкороткий импульс.

В современном обществе радиоэлектронная аппаратура (РЭА) стала распространенной и неотъемлемой частью жизни, а ее корректное функционирование – залогом безопасности и спокойствия. Широкое распространение РЭА повлекло за собой появление нового вида угрозы – электромагнитного терроризма (ЭМТ). Суть ЭМТ состоит в дестабилизации или разрушении РЭА [1, 2]. Сверхкороткие импульсы (СКИ) являются частным случаем преднамеренных электромагнитных импульсов, выступающим в качестве средства ЭМТ, способного вывести РЭА из строя. СКИ представляют собой импульсные сигналы большой амплитуды и малой длительности, которые могут проникать в РЭА различными способами, например по цепям питания [3].

Для защиты РЭА от СКИ предложена технология модальной фильтрации, принцип действия которой заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды [4]. Устройства, функционирующие по принципу модальной фильтрации, называются модальными фильтрами (МФ). При разработке МФ особое внимание уделяется улучшению их защитных характеристик за счет обеспечения высокого значения разностей задержек мод и выравнивания амплитуд импульсов разложения на выходе МФ. Первое требование необходимо для увеличения длительности воздействующего СКИ, который будет полностью раскладываться на последовательность импульсов, а второе – для уменьшения амплитуд импульсов разложения. Степень электромагнитной связи между проводниками МФ, регулируемая параметрами структуры, играет важную роль в решении данных задач.

Одним из важнейших этапов разработки МФ является оптимизация. Для этого применяются параметрическая (изменение значений параметров МФ) и/или структурная (внесение изменений в структуру МФ посредством изменения числа проводников, диэлектрических слоев, вырезов и др.) оптимизации. Зачастую структурная оптимизация выполняется эмпирическим путем (с использованием опыта практического моделирования и оптимизации), тогда как параметрическая оптимизация осуществима различными способами: от использования эвристического поиска (ручная оптимизация) до методов глобальной

оптимизации (эволюционные алгоритмы, детерминированные и стохастические методы и др.).

Общий вид задач оптимизации создает большое разнообразие их классов. От класса задачи зависит выбор способа оптимизации и как следствие эффективность её решения. Классификацию задач определяет целевая функция (ЦФ) и допустимая область (задаётся системой неравенств и равенств или более сложным алгоритмом) [5]. В соответствии с задачами методы оптимизации классифицируют на глобальные и локальные. Первые имеют дело с многоэкстремальными ЦФ. При глобальном поиске основной задачей является выявление тенденций глобального поведения ЦФ. Вторые сходятся к какому-либо локальному экстремуму целевой функции. В случае если экстремум единствен, он и будет глобальным максимумом / минимумом. Отдельным классом являются эволюционные алгоритмы, работающие по принципу естественного отбора из теории Дарвина. Зачастую необходимо оптимизировать целый ряд параметров структуры, от которых будет зависеть конечный результат. Эволюционные алгоритмы, в частности генетический алгоритм (ГА) и эволюционные стратегии (ЭС), хорошо себя показывают в задачах оптимизации по нескольким параметрам одновременно, однако при этом увеличивается и общее время вычисления.

В задачах оптимизации МФ чаще всего применяется именно ГА ввиду его универсальности, выраженной в возможности многокритериальной оптимизации, а также быстрой сходимости значений к глобальному экстремуму вне зависимости от конфигурации МФ. Однако его существенным недостатком является большое время расчетов. Между тем при оптимизации МФ с помощью ЭС также наблюдается сходимость результатов, но её результаты уступают результатам оптимизации с помощью ГА, что говорит о нахождении локального экстремума. Тем не менее, время, затраченное на оптимизацию МФ по ЭС, в разы меньше, по сравнению с использованием ГА [6]. Так, одной из причин расхождений в работе двух алгоритмов является отсутствие возможности задания необходимых ограничений (диапазонов значений изменения параметров МФ) при работе ЭС. Цель работы – восполнить этот пробел.

### Эволюционные стратегии

В ЭС каждая особь характеризуется [7]: функцией пригодности, которая выбирается с учетом специфики конкретной задачи оптимизации; строкой-хромосомой, включающей в себя вектор некоторого решения оптимизационной задачи; среднеквадратическим отклонением (шаг мутации), от которого зависят величина мутации и угол ротации, который является необходимым параметром для реализации коррелируемой мутации, позволяющей учитывать ландшафт ЦФ. В процессе работы алгоритма ЭС происходит адаптация значений шага мутации и угла ротации [8]. Порядок работы алгоритма ЭС выглядит следующим образом: инициализация; скрещивание и мутация; расчет потомков с использованием функции пригодности; селекция; проверка условия остановки ЭС [9]. В качестве критериев остановки могут выступать: максимальное число итераций (расчетов ЦФ), которое определяется как  $10^3 N^2$ , где  $N$  – размер пространства поиска; число поколений без изменения лучшего значения ЦФ; малая разница между лучшим и средним значением ЦФ; малое изменение шага мутации и др.

### Структура и схема исследуемого МФ

Для сравнительного анализа результатов работы ЭС без введения ограничений и с ними выбран МФ с лицевой связью [10] длиной  $l = 60$  см. Поперечное сечение МФ представлено на рис. 1, где  $w$  – ширина проводников,  $s$  – расстояние между активным и опорным проводниками,  $t$  – толщина проводников,  $h$  – толщина подложки,  $d$  – расстояние от края МФ до активного (А) и пассивного (П) проводников с левой и до опорного (О) с правой стороны МФ, а  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Эквивалентная схема МФ представлена на рис. 2. Неизменными параметрами МФ приняты следующие:  $w = 2000$  мкм,  $d = w$ . В качестве оптимизируемых параметров приняты  $h$ ,  $t$  и  $s$ . Оптимизация выполнялась по критерию минимизации максимального значения выходного напряжения  $U_{\max}$  (которая возможна, как отмечалось ранее, при выравнивании амплитуд импульсов разложения).

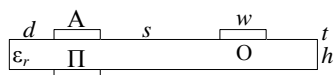


Рис. 1. Поперечное сечение МФ с лицевой связью

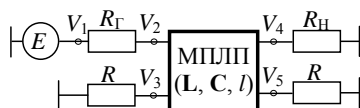


Рис. 2. Эквивалентная схема МФ с лицевой связью

Вычисление временных откликов МФ выполнялось в системе TALGAT [11]. Параметры воздействующего СКИ: ЭДС 1 В, длительность плоской вершины импульса  $t_d = 50$  пс, время нарастания и спада сигнала  $t_\phi = t_c = 50$  пс (так что общая длительность импульса  $t_\Sigma = 150$  пс). Сопротивления на концах МФ  $R$  приняты равными 50 Ом.

### Результаты моделирования

Как правило, при оптимизации структур с помощью ЭС применяется открытая библиотека `baresmaes2` с алгоритмом на языке Python [12]. В качестве входных параметров для алгоритма используются список, состоящий из начальных точек отсчета для каждого оптимизируемого параметра, и начальный размер шага, который адаптируется и изменяется в процессе оптимизации. Начальные точки отсчета выбраны  $h = 300$  мкм,  $t = 30$  мкм и  $s = 300$  мкм. Как отмечалось ранее, к входным параметрам не относятся пределы для каждого параметра, что приводит в общем случае к физически нереализуемому результату. В данной работе рассматривается решение данной проблемы без вмешательства непосредственно в алгоритм.

Поскольку алгоритм генерирует список из искомым переменных, начиная с задаваемой пользователем начальной точки и с изменяемым в процессе оптимизации шагом, важно «отсеять» вышедшие за требуемый диапазон значения и «направить» их в пределы диапазона оптимизируемых параметров (например, если значение отрицательное, переместить точку поиска «выше»). Подобную задачу также можно решить путем исключения значений, вышедших за границы диапазона, однако это приведет к ошибкам в работе ЭС. Кроме этого, такой подход не решил бы задачу «возвращения» в диапазон значений, вышедших за него. Поэтому задача была решена путем замены вышедшего за границы диапазона значения на случайное в выбранном диапазоне. Стоит отметить, что вышедшее за границы диапазона значение можно было заменить и на начальные точки отсчета, приведенные выше, однако это влияет на весь прогресс, достигнутый в результате выполнения алгоритма, тогда как замена на случайное значение в выбранном диапазоне в общем случае не нарушает прогресс алгоритма. Блок-схема алгоритма оптимизации ЭС с ограничениями представлена на рис. 3.

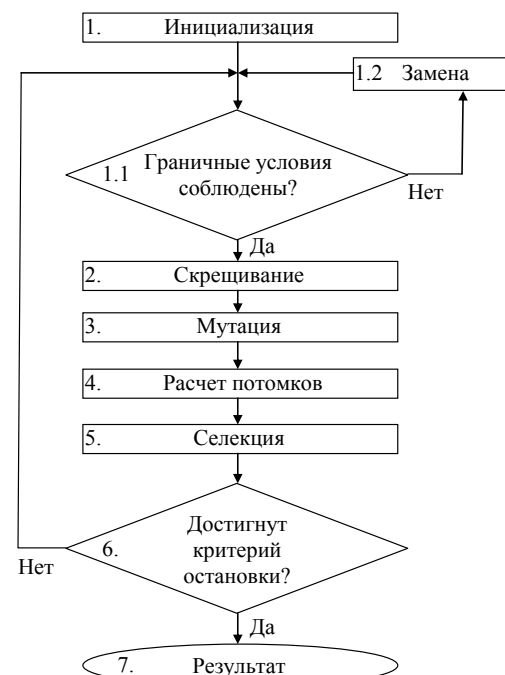


Рис. 3. Блок-схема работы ЭС с ограничениями

Она отличается от традиционной добавлением элементов 1.1 и 1.2, отвечающих за замену вышедшего за границы диапазона значения на случайное в выбранном диапазоне.

Таблица 1  
Результаты оптимизации МФ с лицевой связью по алгоритму ЭС без ограничений

$N$	$h$ , мкм	$t$ , мкм	$s$ , мкм	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
$N_{it} = 500$						
1	295	123,6	319,5	57	564	$Q$
2	295,8	123,5	298,1	56,6	371	$Q$
3	303,3	123,6	315	58	249	$Q$
4	278,3	123,4	303,4	54,6	355	$Q$
5	280	123,3	294,7	54,6	481	$Q$
6	302,4	121,6	300,7	57,2	82	$Q$
7	297	123,5	300	56,9	209	$Q$
8	300,8	123,6	301,1	57,3	317	$Q$
9	292,2	123,7	288,9	55,8	102	$Q$
10	306	123,8	294,3	57,6	217	$Q$
$N_{it} = 1000$						
1	300,6	123,3	303,7	57,5	329	$Q$
2	191,5	120,8	359,5	42,3	1627	$I$
3	298,8	123,6	294,6	56,8	205	$Q$
4	304,5	123,7	300,3	57,7	258	$Q$
5	302,7	123,5	296,8	57,5	191,3	$Q$
6	299	123,3	302,2	57,3	168	$Q$
7	295	123,7	312	56,9	261	$Q$
8	301,3	123,4	302,7	57,6	366	$Q$
9	304,3	123,3	305	58,1	246	$Q$
10	236,4	122,8	162	43,1	1262	$Q$
$N_{it} = 2500$						
1	187,5	122,6	147,8	35,1	1726	$Q$
2	297	123,7	294	56,6	349	$Q$
3	297	123,6	299,5	56,8	356	$Q$
4	306,3	123,2	298,3	58,2	230	$Q$
5	284,5	123,2	307	55,8	395	$Q$
6	291	123,6	294,7	55,9	153	$Q$
7	296	123,7	288,9	56,3	314	$Q$
8	306,9	123,6	285,7	57,5	256	$Q$
9	303,5	123,6	291,5	57,4	416	$Q$
10	315,6	123,7	308,5	59,3	163	$Q$
$N_{it} = 5000$						
1	284,9	123	291	55,5	292	$Q$
2	297	123,3	297,1	57	223	$Q$
3	300	123,5	298,3	57,2	168	$Q$
4	298,3	123,5	285	56,6	386	$Q$
5	262,2	123,2	233,7	50,2	511	$Q$
6	301,4	123,6	301,9	57,4	328	$Q$
7	295,2	123,6	295,5	56,5	705	$Q$
8	282	123,6	312	55,3	396	$Q$
9	298	120,5	299	69,2	93	$Q$
10	279,5	123,5	299,5	54,7	620	$Q$
$N_{it}^{max}$						
1	300,4	123,4	302,4	57,4	159	$Q$
2	293,1	123,2	310	56,9	118	$Q$
3	297,7	123	297,5	57,3	173	$Q$
4	304	123,5	276,2	56,9	450	$Q$
5	302,1	123,4	278	56,8	392	$Q$
6	299	123,4	297	57,1	254	$Q$
7	299	123,5	302,5	57,2	345	$Q$
8	294,7	121,2	297,7	55,8	81	$Q$
9	287	123,3	264,3	54,6	1307	$Q$
10	317,5	123,4	293,4	59,1	221	$Q$

В табл. 1 приведены результаты оптимизации МФ с лицевой связью посредством ЭС без указания ограничений. В таблицу сведены время расчета, значения максимальной амплитуды выходного сигнала, а также значения оптимизируемых параметров, при которых получены данные показатели. Используются критерии останова ЭС (stop):  $I$  – по достижении максимума вычислений,  $P$  – сходимость значений оптимизируемых параметров и  $Q$  – сходимость ЦФ. В табл. 2 приведены результаты оптимизации МФ с ограничениями (где  $N$  – число запусков,  $N_{it}$  – число вычислений при одном запуске, а  $N_{it}^{max}$  – без указания числа вычислений), выполненными методом рандомизации вышедших за границу значений в указанном диапазоне с указанием времени вычисления (время).

При оптимизации без ограничений сходимость параметра  $t$  наблюдается при  $-2$  мкм, что является нефизичным значением. Исходя из этого, начальная точка отсчета данного параметра изменена на 110 мкм.

Для проверки работоспособности алгоритма проверим его на более узком диапазоне значений. Прежние значения искомым параметров находились в пределах 100–2000 мкм для  $h$  и  $s$  и 18–200 мкм для  $t$ . Уменьшим данный диапазон значений до 250–350 мкм для  $h$  и  $s$  и 50–150 мкм для  $t$ .

В табл. 3 сведены результаты проверки работоспособности алгоритма с более узким диапазоном поиска значений.

Из табл. 3 видно, что, несмотря на уменьшенный диапазон оптимизируемых параметров, полученные значения не выходят из указанного диапазона. На рис. 4 показаны формы напряжений на выходе МФ с лицевой связью для наилучшего результата оптимизации по критерию минимизации максимального уровня выходного напряжения при разном числе итераций.

Из рис. 4 видно, что на моду 1 (распространяющуюся большей частью в воздухе) потери в диэлектрике действуют сильнее, чем на моду 2 (распространяющуюся большей частью в диэлектрике), что физически невозможно. Это выражается в увеличении времени фронта и спада импульсов разложения из-за влияния дисперсии. Причина кроется в погрешностях моделирования. Так, при моделировании число сегментов на диэлектрических границах (разделение сред воздух–диэлектрик) вдоль параметров  $d$  и  $s$  принималось равным 20, что является недостаточным для корректного моделирования. Увеличение данного значения до 100 позволит исправить данную проблему. Между тем в рамках данной работы оптимизация выполнялась при 20 сегментах на этих участках для всех случаев, что позволяет выполнить качественную оценку полученных результатов.

Из табл. 1 и рис. 4, а видно, что при оптимизации без ограничений наблюдается сходимость значений оптимизируемых параметров вне зависимости от числа вычислений. Несмотря на это, формы напряжения на выходе МФ представляются двумя импульсами разной амплитуды (0,026 и 0,035 В). Очевидно, что для достижения критерия минимизации максимальной амплитуды энергия воздействующего им-



пульса должна быть равномерно распределена между импульсами разложения, обеспечив равенство амплитуд импульсов, чего в данном случае не происходит.

Таблица 2  
Результаты оптимизации МФ с лицевой связью по алгоритму ЭС с ограничениями

N	$N_{it} = 500$					
	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
1	160,1	125,3	1695	41,2	822	I
2	231	120,3	283,5	46,8	826	I
3	270,3	123	241,5	51,8	819	I
4	354,1	121,6	302	62,2	847	I
5	111	120,2	1138	28,6	823	I
6	303,2	123,7	328	58,4	816	I
7	278,1	123,3	314,7	55	816	I
8	279,1	123,6	323,7	55,3	821	I
9	311,5	121,3	295,1	57,6	825	I
10	381,3	125	395	75,6	840	I
N	$N_{it} = 1\ 000$					
	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
1	238,7	123,3	326,8	56,1	1566	Q
2	294,3	123,8	312,4	56,7	1617	I
3	116,7	123,3	1627	31,6	1648	I
4	132,3	123,7	1757	35,1	1452	Q
5	431,2	124,3	542,6	76	1098	Q
6	140	123	401,6	32,8	373	Q
7	450,7	124,9	416,8	74,7	1641	I
8	133,6	119	1136	50,9	1692	I
9	344,3	123,8	403,2	65	1485	Q
10	130	123,1	1898	35,5	1295	Q
N	$N_{it} = 2\ 500$					
	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
1	288,4	123,6	371	57,6	1539	Q
2	323	21,8	292	119,5	1507	Q
3	494,6	143,8	547,6	130	928	Q
4	108,2	120	1208	27,9	3138	Q
5	317	123,9	429,5	62,3	2266	Q
6	256,5	125,2	1406	58,7	1392	Q
7	384,5	123,3	262,7	64,7	1006	Q
8	121,4	123,6	1871	32,8	2239	Q
9	117	124,3	1925	31,1	1147	Q
10	107,7	123,9	1270	28,2	2847	Q
N	$N_{it} = 5\ 000$					
	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
1	132	123,4	850	33,4	4463	Q
2	284	123,6	288	54,7	2896	Q
3	161,8	119,8	140,9	105,5	2017	Q
4	114,2	124,6	104,2	115,8	1072	Q
5	397,5	124,2	356,2	68,8	2406	Q
6	135,3	120	640	40,1	772	Q
7	113	123,6	168	68	988	Q
8	108,5	124	188,2	78,7	1247	Q
9	276,8	124	305,1	55,6	2457	Q
10	104,7	123,6	180,2	66,2	1284	Q
N	$N_{it}^{max}$					
	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с	stop
1	429,7	121	489,4	73,6	1345	Q
2	283,7	121,4	343,6	56,1	1148	Q
3	121,7	119,6	154,9	103,5	1330	Q
4	102,1	123,2	180,4	50,4	1742	Q
5	164,3	126,3	163,8	126,5	1575	Q
6	216,5	122,8	270	45	3404	Q
7	156,6	123,2	141,2	52,6	1531	Q
8	303,9	121,2	314,9	57,4	1408	Q
9	152,3	124	195,9	74,9	1458	Q
10	424,4	121,1	494,2	73,3	667	Q

Таблица 3

Результаты оптимизации МФ с лицевой связью по алгоритму ЭС в уменьшенных диапазонах изменения оптимизируемых параметров при  $N_{it}^{max}$

N	$h$ , мкМ	$t$ , мкМ	$s$ , мкМ	$U_{max}$ , мВ	Время, с
1	285	120,7	320,3	54,2	368
2	257,6	121,5	272	49,2	722
3	281,4	123,3	301	52,2	1336
4	307,7	123,4	319,3	55,7	206
5	256,5	123,3	297,4	49	627
6	325,5	123,8	275,2	55,6	609
7	300	123,7	304	54,1	705
8	253,3	120,9	328,3	50,3	1448
9	259,3	123	294,4	49,4	1436
10	262,7	123,4	337,6	50,8	2073

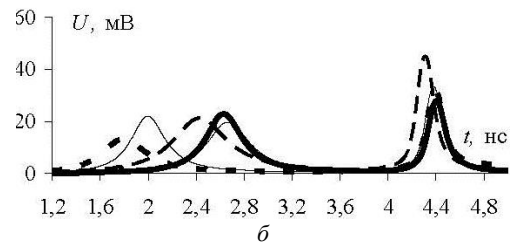
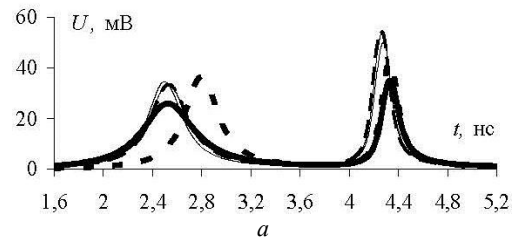


Рис. 4. Формы выходных напряжений при числе итераций: 500 (—), 1000 (· · ·), 2500 (— · —), 5000 (· · · · ·), без итераций (- -) для оптимизации без ограничений – а; с ограничениями – б

Между тем из табл. 2 и рис. 4, б не наблюдается сходимости значений параметров как таковой. Однако формы напряжения на выходе МФ (при 500 и 2 500 вычислениях) показывают максимальное значение выходного напряжения около 0,028 В при относительно равных амплитудах импульсов разложения (импульс  $I = 0,02$  В). Кроме этого, значения, полученные при оптимизации с ограничениями, лежат в требуемом диапазоне.

#### Обсуждение результатов

Время расчетов после введения ограничений увеличивается. Это можно объяснить тем, что приравнивание оптимизируемого значения случайному числу в указанном диапазоне замедляет процесс работы алгоритма, приводя дополнительные случайные переменные, относительно которых возобновляется работа алгоритма всякий раз после выхода за границы. Отметим, что для нахождения решения, алгоритму с ограничениями требуется около 1 500 итераций и, в среднем, 1 600 с (в алгоритме без ограничений – в среднем 600 с). Между тем при оптимизации без ограничений наблюдалась сходимость к определенному диапазону значений, однако с введением ограничений данный диапазон стал более «размытым». Это происходит по причине замены числа, вышед-

шего за границы, на случайное, особенно ввиду того, что диапазон значений брался довольно широкий.

Несмотря на ухудшение сходимости результатов, а также увеличение времени расчетов, в результате такого подхода удалось получить максимальное значение выходного напряжения около 0,028 В (что в 1,25 раза меньше значения 0,035 В, полученного при оптимизации без указания ограничений) при близких амплитудах импульсов разложения. К достоинствам ЭС с ограничениями можно отнести возможность оптимизации защитных устройств в требуемом диапазоне параметров и итоговые результаты, полученные в том числе благодаря внесению элемента случайности, реализованному в ЭС с ограничениями. К недостаткам можно отнести увеличенное время вычисления и отсутствие сходимости результатов оптимизации.

### Заключение

Реализована возможность реализации алгоритма оптимизации ЭС с установлением ограничений, под которыми понимается задание диапазонов изменения оптимизируемых параметров. Это выполнено без вмешательства в исходную библиотеку. Удалось достичь поставленной задачи посредством введения ограничений в расчеты. Дальнейшим шагом в данном направлении будет поиск возможностей по улучшению результата оптимизации с помощью ЭС с указанием ограничений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0041.

### Литература

1. Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров // Военный инженер. – 2016. – № 2 (2). – С. 10–17.
2. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т.Р. Газизова. – Томск: Том. гос. ун-т, 2002. – 206 с.
3. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Vol. 61, No. 5. – P. 546–550.
4. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во

Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 151 с.

5. Аоки М. Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977. – 356 с.

6. Белоусов А.О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск. – 2020. – 247 с.

7. Evolutionary Modeling of Larval Dispersal in Blowflies Using Non-Uniform Cellular Automata / Ana L.T. Romano, L. Gomes, G. Gomes, W. Puma-Villanueva, M. Zanetti, C.J. Von Zuben, F.J. Von Zuben // IEEE Congress on Evolutionary Computation Sheraton. – Canada, Vancouver, 2006. – P. 1127–1134.

8. Эволюционные методы моделирования и оптимизации сложных систем / Е.С. Семеникин, М.Н. Жукова, В.Г. Жуков, И.А. Панфилов, В.В. Тынченко // Конспект лекций. – Красноярск: Изд-во ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 2007. – 310 с.

9. Hansen N. Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies / N. Hansen, A. Ostermeier // Evolutionary Computation. – 2001. – Vol. 9, № 2. – P. 159–96.

10. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783

11. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110

12. Hansen N. Python: module barecmaes2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~nikolaus.hansen/barecmaes2.html>, свободный (дата обращения: 22.09.2021).

### Белоусов Антон Олегович

Канд. техн. наук, м.н.с. НИЛ «ФИЭМС»,  
доцент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
ORCID 0000-0002-0154-8014  
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

### Гордеева Виктория Олеговна

Техник НИЛ «ФИЭМС», магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: vikki.gern@gmail.com

А.О. Белоусов, Н.О. Власова, Т.Р. Газизов

## Параметрическая оптимизация многопроводных модальных фильтров с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров

Впервые выполнены имитационное моделирование и оптимизация многопроводных модальных фильтров (МФ) с круговым сечением в диапазоне их реальных геометрических параметров в исполнении с экраном и без него. Рассмотрено 5 структур МФ с количеством проводников 2, 3 и 4. Выполнена параметрическая оптимизация эвристическим поиском, направленным на полное разложение воздействующего сверхкороткого импульса. Это достигнуто за счет обеспечения разной связи между активным и пассивным проводниками. Оптимизация выполнялась по амплитудному и временным критериям. Достигнуто полное разложение воздействующего помехового сигнала во всех МФ с максимальным коэффициентом ослабления 3,7 раза. Кроме этого, достигнуты близкие интервалы времени между импульсами разложения в 4 структурах МФ.

**Ключевые слова:** параметрическая оптимизация, многопроводные модальные фильтры, круговое сечение, экранирование, сверхкороткий импульс.

За последние годы в различных отраслях промышленности заметно возросло число технических средств (ТС) различного назначения. В то же время рост их количества обостряет проблему обеспечения электромагнитной совместимости, которая связана, в данном случае, со стремительным ростом влияния электромагнитных помех (ЭМП) различной природы на функционирование ТС [1]. Особую опасность представляют кондуктивные помехи, распространяющиеся непосредственно по проводникам. Примером могут служить сверхкороткие импульсы (СКИ) с высоким уровнем напряжения и субнаносекундным временем нарастания. Обладая короткой длительностью и широким спектром, СКИ способны локализоваться в критичных узлах ТС, нарушая их работу и даже выводя полностью ТС из строя. Поэтому актуальна защита ТС, в частности, средств безопасности и управления критичным оборудованием.

Известно, что традиционные устройства защиты, включаемые на входе ТС, не лишены недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры, малый срок службы). Поэтому для защиты от мощного СКИ применяется технология модальной фильтрации, суть которой заключается в разложении воздействующего СКИ на последовательность импульсов из-за различия задержек мод [2–4] в многопроводных линиях передачи (МПЛП). Данная технология результативно применяется в защитных устройствах, названных модальными фильтрами (МФ) [5]. Между тем традиционные МФ реализуются преимущественно на связанных и многопроводных полосковых структурах. Однако интерес представляют МФ на основе структур с круговым сечением (защитные кабели), которые имеют несколько важных достоинств по сравнению с МФ на основе полосковых структур: гибкость конструкции, большая длина и возможность использования готовых кабелей. Тем не менее модальная фильтрация в защитных структурах с круговым сечением исследована недостаточно [6]. Так, интерес представляет исследование возможности полного разложения СКИ

на выходе 2-, 3- и 4-проводных МФ с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров (для их будущей реализации), а также влияния внешнего экрана на характеристики таких МФ. Цель работы – выполнить такое исследование.

### Подходы к моделированию

Моделирование выполнено в системе TALGAT [7]. Сначала построены геометрические модели поперечного сечения МФ. Затем вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической ( $C$ ) и электромагнитной ( $L$ ) индукций.

В рамках данной работы потери не учитывались, чтобы исключить их влияние на данном этапе исследования. Далее составлены эквивалентные схемы для моделирования и заданы окончания и воздействие. Наконец, вычислен временной отклик на импульсное воздействие.

Для исследования выбраны МФ, ранее исследованные в работах [8, 9]. Поперечные сечения приведены на рис. 1, где  $\epsilon_{ri}$  – относительная диэлектрическая проницаемость, а  $r_i$  – радиус элемента поперечного сечения. В работе исследованы МФ 1 (с числом проводников  $N = 2$ ), МФ 2 ( $N = 2$ ), МФ 3 ( $N = 3$ ), МФ 4 ( $N = 3$ ) и МФ 5 ( $N = 4$ ). Рассмотрим подробнее исследуемые МФ с круговым сечением:

– МФ 1 представляет собой центральный опорный проводник, который покрыт диэлектриком, вокруг которого симметрично расположены два проводника, а вся структура покрыта диэлектриком;

– МФ 2 представляет собой экранированную структуру, в центре которой расположен диэлектрический «стержень», вокруг которого на небольшом расстоянии симметрично расположены два проводника в диэлектрическом заполнении;

– МФ 3 представляет собой опорный проводник, покрытый диэлектриком, вокруг которого расположены три проводника, а вся структура покрыта диэлектриком;

– МФ 4 представляет собой экранированную структуру, в центре которой расположен диэлектрический «стержень», вокруг которого на небольшом

расстоянии расположены три проводника в диэлектрическом заполнении;

– МФ 5 представляет собой экранированную структуру, внутри которой, на некотором расстоянии относительно центра расположены четыре проводника в диэлектрическом заполнении.

При моделировании МФ 1–5 значения окончаний проводников ( $R$ ) приняты равными 50 Ом. В качестве входного воздействия использован источник трапециевидных импульсных сигналов с ЭДС 5 В и общей длительностью 150 пс. Эквивалентные схемы МФ длиной 1 м представлены на рис. 1, *e–з*. Вычисленные формы напряжений на выходе МФ 1–5 после оптимизации приведены на рис. 2.

**Результаты моделирования**

Приведем диапазоны значений реальных геометрических параметров (мм) типовых проводов и кабелей, близких по структуре поперечного сечения к рассматриваемым МФ. Провод АППВ 3\*2,5: радиусы проводников варьируются в диапазоне 1,15–1,45, толщина изоляции – 0,5–1,1, длина разделительного основания – 0,8–1 и толщина разделительного основания – 0,6–0,8. Кабель АВВГ-П 3х6(ож)-0,66: радиусы проводников варьируются в диапазоне 1,3–1,5, толщина изоляции – 0,5–1,1 и толщина оболочки – 0,7–1,5. Расстояние между оплеткой и изоляцией состав-

ляет в среднем 0,15. Кабель NYM 4x10-0,66: радиус проводников варьируются в диапазоне 1,7–2,15, толщина изоляции вокруг проводников – 0,8–1,1, толщина внешней изоляции – 1,3–1,6, диаметр внутренней изоляции – 15–16 и общий диаметр – 18–19,5.

В результате параметрической оптимизации МФ 1–5 получены следующие значения (мм): для МФ 1 –  $r_1 = 0,9, r_2 = 1,6, r_3 = 3,5, r_4 = 3,6$  при  $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 6, \epsilon_{r3} = 3$ ; для МФ 2 –  $r_1 = 0,9, r_2 = 0,7, r_3 = 4,3, r_4 = 4,5$  при  $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 10, \epsilon_{r3} = 3$ ; для МФ 3 –  $r_1$  (проводник 1) = 0,9,  $r_1$  (проводник 2) = 0,88,  $r_1$  (проводник 3) = 0,89,  $r_2 = 1,6, r_3 = 3,5$  при  $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 10, \epsilon_{r3} = 3$ ; для МФ 4 –  $r_1$  (проводник 1) = 0,5,  $r_1$  (проводник 2) = 0,35,  $r_1$  (проводник 3) = 0,52,  $r_2 = 1,35, r_3 = 2,7, r_4 = 3,5$  при  $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 5, \epsilon_{r3} = 10$ ; для МФ 5 –  $r_1$  (проводник 1) = 0,9,  $r_1$  (проводник 2) = 0,5,  $r_1$  (проводник 3 и 4) = 0,7,  $r_3 = 3, r_4 = 4, r_5$  (проводник 1) = 0,97,  $r_5$  (проводник 2) = 0,55,  $r_5$  (проводник 3 и 4) = 0,85 при  $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r3} = 3, \epsilon_{r4}$  (проводник 1) = 20,  $\epsilon_{r4}$  (проводник 2) = 17,  $\epsilon_{r4}$  (проводник 3) = 10,  $\epsilon_{r4}$  (проводник 4) = 5. В результате полученные значения лежат в диапазоне реальных параметров известных кабелей.

В табл. 1 приведены основные характеристики (амплитуды входного импульса  $U_{вх}$ , а также импульсов разложения  $U_i$  и разность погонных задержек  $\Delta\tau_i$ ) МФ 1–5 после их оптимизации.

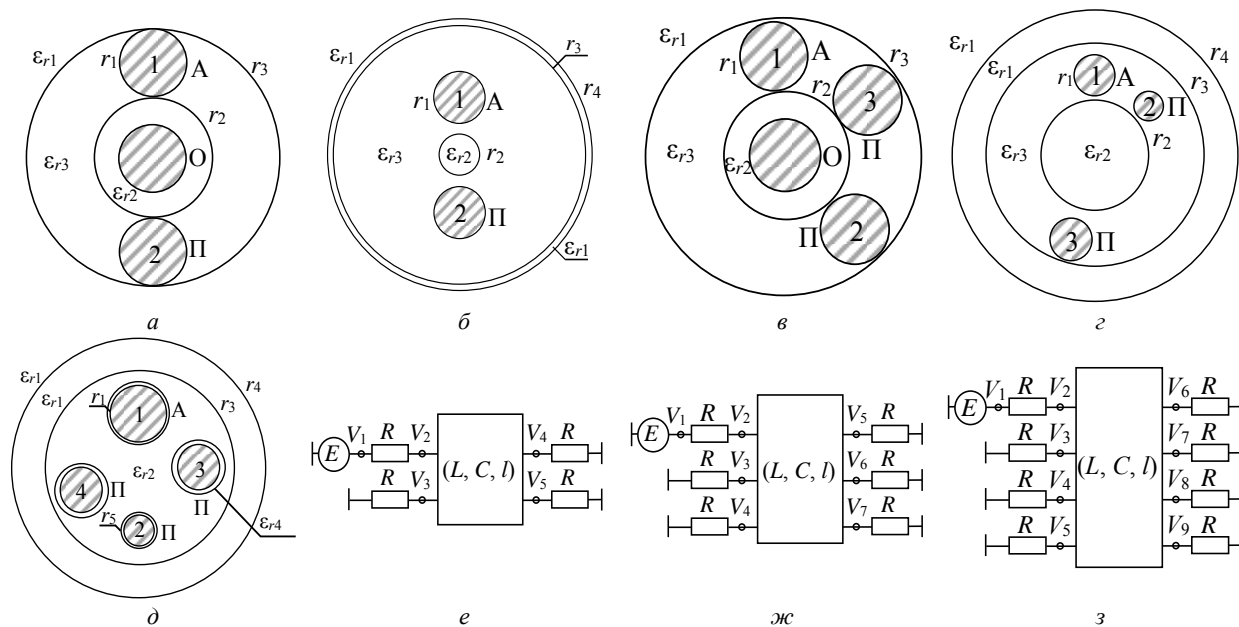


Рис. 1. Поперечные сечения МФ 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*), 4 (*г*) и 5 (*д*) после оптимизации и их эквивалентные схемы (*e–з*)

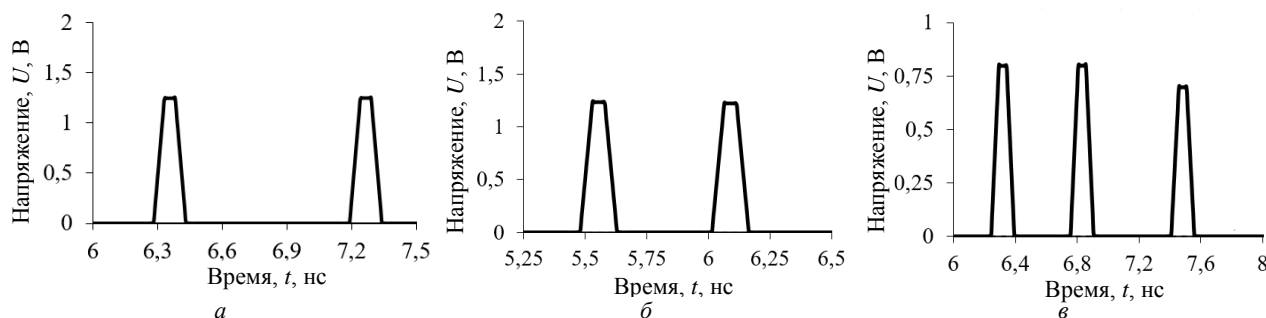


Рис. 2 (начало)

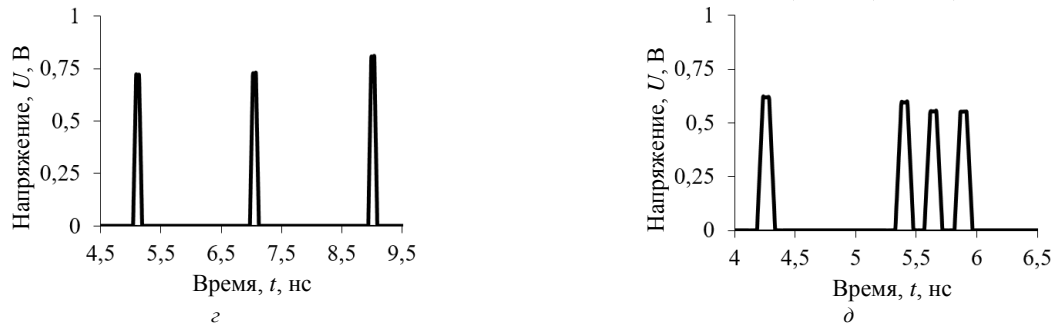


Рис. 2 (окончание). Формы напряжений на выходе МФ 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д) после оптимизации

Амплитуды импульсов разложения ( $U_i$ ) на выходе МФ 1–5 и значения разностей погонных задержек мод ( $\Delta\tau_i$ )

МФ	$U_{вх}$ , В	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$\Delta\tau_1$	$\Delta\tau_2$	$\Delta\tau_3$
1	2,49	1,25	1,24	–	–	0,77	–	–
2	2,45	1,23	1,22	–	–	0,38	–	–
3	2,3	0,8	0,8	0,7	–	0,31	0,5	–
4	2,3	0,71	0,72	0,8	–	1,74	1,81	–
5	2,3	0,62	0,59	0,55	0,55	1	0,03	0,11

Из рис. 2, а видно, что к концу линии приходят 2 импульса вдвое меньшей амплитуды (по отношению к  $U_{вх}$ ). При этом импульсы разложения не накладываются друг на друга, уменьшая тем самым максимальное значение выходного напряжения  $U_{max}$ . Из таблицы следует, что значение  $\Delta\tau_1$  составляет 0,77 нс/м, что позволяет увеличить длительность входного импульса до 0,9 нс (согласно отклику) при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, б видно, что к концу линии приходят 2 импульса, каждый из которых также в 2 раза меньше  $U_{вх}$ . Импульсы разложения, как и в случае с МФ 1, не накладываются друг на друга. Значение  $\Delta\tau_1$  составляет 0,38 нс/м, что позволяет увеличить длительность входного импульса до 0,5 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, в видно, что к концу линии приходят 3 импульса. При этом первый – в 2,88 раза, второй – в 2,88 раза, а третий – в 3,33 раза меньше значения  $U_{вх}$ . Также видно, что импульсы разложения, как и в случае с МФ 1, не накладываются друг на друга. Значение  $U_{max}$  составляет 0,8 В, что в 2,88 раза меньше значения  $U_{вх}$ . Значение  $\Delta\tau_1$  составляет 0,31 нс/м, а  $\Delta\tau_2$  – 0,5 нс/м. Поскольку минимальное значение  $\Delta\tau$  составляет 0,31 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 0,46 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, г видно, что к концу линии приходят 3 импульса. При этом первый – в 3,23 раза, второй – в 3,2 раза, а третий – в 2,87 раза меньше значения  $U_{вх}$ . Также видно, что выходные импульсы не накладываются друг на друга. Значение  $U_{max}$  составляет 0,8 В, что в 2,87 раза меньше значения  $U_{вх}$ . Значение  $\Delta\tau_1$  составляет 1,74 нс/м, а  $\Delta\tau_2$  – 1,81 нс/м. Поскольку минимальное значение  $\Delta\tau$  составляет 1,74 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 1,89 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из рис. 2, д видно, что к концу линии приходят 4 импульса. При этом первый – в 3,7 раза, второй – в 3,9 раза, а третий и четвертый – в 4,18 раза меньше

значения  $U_{вх}$ . Значение  $U_{max}$  составляет 0,62 В, что в 3,7 раза меньше значения  $U_{вх}$ . Значение  $\Delta\tau_1$  составляет 1 нс/м,  $\Delta\tau_2$  – 0,03 нс/м, а  $\Delta\tau_3$  – 0,11 нс/м, следовательно, не происходит наложения импульсов друг на друга. Поскольку минимальное значение  $\Delta\tau$  составляет 0,03 нс/м, то возможно увеличение длительности входного импульса до 0,18 нс при том же коэффициенте ослабления.

Из данных, приведенных в таблицы, видно, что при оптимизации с учетом реальных параметров удалось добиться полного разложения воздействующего СКИ в МФ 1–5. При оптимизации МФ 3 и МФ 4 удалось выравнять амплитуды первых двух импульсов, а для МФ 4 достигнуто выравнивание интервалов времени между импульсами разложения. При оптимизации МФ 5 удалось попарно выравнять амплитуды импульсов 1 и 2 и импульсов 3 и 4, однако не удалось добиться выполнения интервально-временного критерия (выравнивание интервалов времени между импульсами разложения). Между тем полученные при оптимизации параметры позволяют приблизиться к согласованию структур с трактом (поскольку полученное значение  $U_{вх}$  близко к половине ЭДС).

### Заключение

Впервые выполнены имитационное моделирование и оптимизация многопроводных МФ с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров при их исполнении в экране и без него. Известно, что защитный экран снижает характеристики защитных устройств, функционирующих на основе эффекта модальной фильтрации из-за особенностей расположения опорного проводника (экран) относительно активного и пассивного проводников. Тем не менее выполнена оптимизация по амплитудному и временным критериям и достигнуто полное разложение воздействующего СКИ во всех МФ за счет обеспечения разной связи между активными и пассивными проводниками. В результате оптимизации достигнуто полное разложение воздействующего СКИ во всех МФ с максимальным ослаблением 3,7 раза

(МФ 5). Кроме этого, достигнуты относительно равные интервалы времени между импульсами разложения в МФ 1–4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

#### Литература

1. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Vol. 61, No. 5. – P. 546–550.
2. Belousov A.O. Complete ultrashort pulse decomposition in modal filters with circular symmetry / A.O. Belousov, T.T. Gazizov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/862/5/052050/pdf>. – 2020. – Vol. 862, No. 5. – P. 1–7.
3. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.
4. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 151 с.
5. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – № 4(19). – С. 40–44.
6. Белоусов А.О. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводной линии передачи с круговой симметрией / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // Матер.

11-й Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 14–18.

7. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012110/pdf>. – 2019. – P. 1–7.

8. Belousov A.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect / A.O. Belousov, N.O. Vlasova // Journal of Physics: Conference Series. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1862/1/012004/pdf>. – 2021. – Vol. 1862, No. 1. – P. 1–6.

9. Belousov A.O. Parametric optimization of shielded multiconductor modal filters with circular cross section / A.O. Belousov, N.O. Vlasova // Proceedings of 22 International conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM–2021). – Eragol, Altai, June 29–July 3, 2021. – P. 1–4.

---

#### Белоусов Антон Олегович

Канд. техн. наук, м.н.с. НИЛ «ФИЭМС»,  
доцент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-0154-8014  
Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

#### Власова Наталья Олеговна

Инженер НИЛ «ФИЭМС», магистрант ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: ostrolistaya97@mail.ru

#### Газизов Тальгат Рашитович

Зав. каф. ТУ, д-р техн. наук, доцент ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-1192-4853  
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

В.Н. Неужин, А.В. Бусыгина

## Обзор способов определения химических и биологических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств

Выполнен обзор способов определения химического состава и обнаружения биологической активности микроорганизмов в жидкостях при помощи СВЧ-устройств. Использование устройств позволяет определять наличие и концентрацию известных химических соединений в жидкостях. Показана возможность оценки изменений концентрации микроорганизмов в жидкостях.

**Ключевые слова:** СВЧ-устройство, жидкость, химическое соединение, биологический объект.

В современном мире наблюдается спрос на простые и дешевые способы контроля различных процессов в пищевой и фармацевтической промышленности, в которых требуется контроль за физиологическими процессами, протекающими в биологических жидкостях в режиме реального времени. Наиболее оптимальными являются способы, обладающие высокой проникающей способностью и позволяющие многоразовое использование, а также не требующие высокой квалификации обслуживающего персонала. Такими качествами обладают радиочастотные методы [1]. Так, применение СВЧ-устройств при исследовании химически сложных и многокомпонентных жидкостей, таких как пищевые продукты, биологические и фармацевтические жидкости, позволяет оперативно оценивать изменения в их электрофизических свойствах.

В медицине широко применяются различные типы жидких лекарственных растворов, состоящих преимущественно из воды. Эти растворы характеризуются высокими значениями диэлектрической проницаемости и невысокой электропроводностью. Одним из способов определения веществ в таких растворах является регистрация изменений в резонансной частоте резонатора, в который они помещены [2, 3]. Эти устройства позволяют автоматизировать процедуры контроля вводимых жидкостей медицинскими аппаратами в биологические объекты. Помимо прочего, СВЧ-устройства обладают достоинствами, необходимыми для исследования различных типов жидких продуктов питания, что делает их привлекательными для повседневного использования [1, 4, 5]. Это обусловлено простотой их механической конструкции и широким диапазоном настроек, а также возможностью фокусировки электрического поля на исследуемом объекте.

Цель работы – выполнить обзор способов определения химических и органических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств.

### Обнаружение биологической активности в жидкостях

Химически активные вещества, такие как антибиотики, оказывают непосредственное влияние на физиологические процессы, протекающие в организме, снижая жизнеспособность и останавливая биохимическую активность бактериальных клеток. Выявление антибиотиков в жидкостях является слож-

ной задачей из-за их большого количества и разнообразия. Для этих целей предложено устройство, состоящее из прямоугольного резонатора, ограниченного пластиной из ниобата лития, покрытой пленкой из пористого полистирола, на которой расположена колония бактериальных клеток (рис. 1) [3]. Возбуждение резонатора осуществляется через коаксиально-волноводный переход.

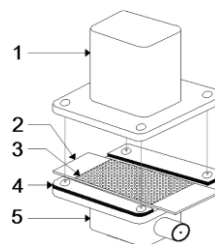


Рис. 1. Устройство обнаружения антибиотика в жидкости: 1 – пластина из ниобата лития; 2 – чувствительный слой; 3 – бактериальный слой; 4 – направляющие для пластины; 5 – волноводно-коаксиальный переход [3]

Для обеспечения постоянных условий эксперимента клетки иммобилизуются (сохраняют свою жизнеспособность в течение длительного времени при постоянной температуре). При добавлении биологических объектов на пленку изменяются характеристики резонатора, в частности, модуль коэффициента отражения  $|S_{11}|$  (рис. 2). Поэтому сначала используется полистирольная пленка со стерильной жидкостью для настройки работы устройства. Из рис. 2 видно, что со временем происходят процессы, связанные с изменением среды обитания и клеточным ответом на внешнее воздействие. Добавление водного раствора ампициллина к клеточной колонии приводит к изменению активности клеток и тем самым электрофизических свойств жидкости. Это выражается в значительном изменении  $|S_{11}|$  в зависимости от разной концентрации химически активного вещества (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что при увеличении концентрации антибиотика среда становится менее комфортна для жизнедеятельности микроорганизмов. Поэтому концентрация антибиотика непосредственно влияет на жизнеспособность микроорганизмов.

Характер происхождения биологических жидкостей влияет на их химические и электрофизические свойства, что осложняет определение в них различных микроорганизмов. Поэтому разработка

устройств, позволяющих оперативно определять живые объекты во всевозможных жидкостях при их различных концентрациях, важна в медицине и пищевой промышленности. Так, известно устройство обнаружения изменения концентрации бактерий в жидких средах с различным рН при помощи анализа резонансных характеристик микроволновой системы [2].

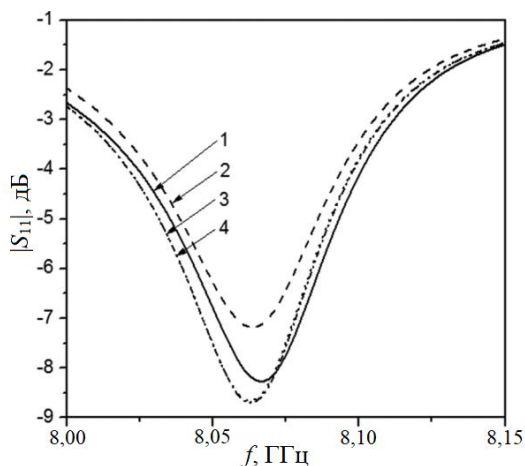


Рис. 2. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  резонатора с полистирольной пленкой (1), содержащей микробные клетки, после 10 (2), 20 (3), и 30 (4) мин [3]

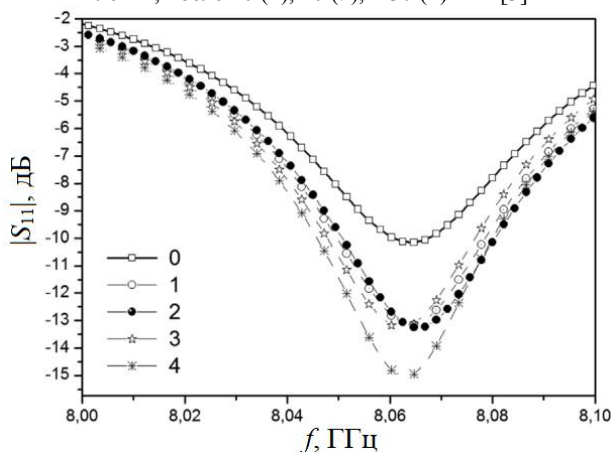


Рис. 3. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  резонатора до (0) и после добавления антибиотика в количестве 4 (1), 10 (2), 25 (3) и 50 (4) мкг/мл [3]

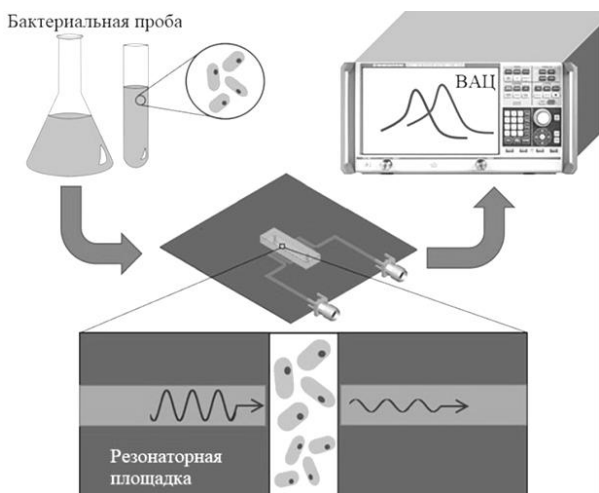


Рис. 4. Схема обнаружения концентрации бактерий в жидкости [2]

Процесс обнаружения роста концентрации микроорганизмов в жидкостях при помощи устройства, подключенного к векторному анализатору цепей, схематично показан на рис. 4.

Рост численности бактерий сопровождается изменением электрофизических параметров жидкости (рис. 5). Из рис. 5 видно, что рост числа бактерий сопровождается изменением значений амплитуды тока ( $I_p$ ) и частоты ( $f_p$ ) резонанса, поэтому возможна регистрация пораженных микроорганизмами жидкостей.

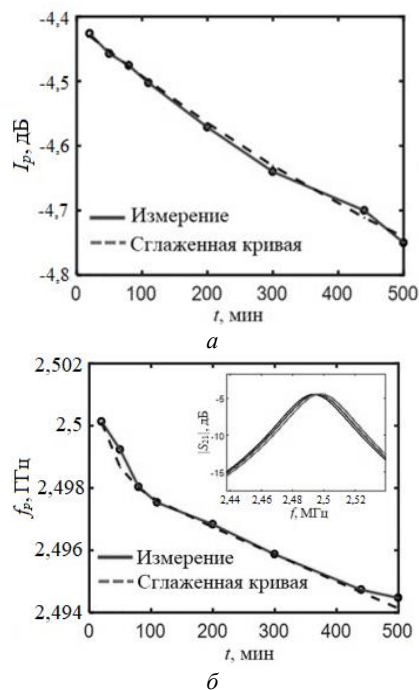


Рис. 5. Изменение резонансного тока (а) и частоты (б) системы при увеличении времени эксперимента [2]

### Коаксиальная ячейка

Для исследования жидких продуктов питания предложен способ, заключающийся в мониторинге их проводимости [1]. Устройство представляет собой коаксиальную ячейку, внутри которой находится исследуемая жидкость (рис. 6).

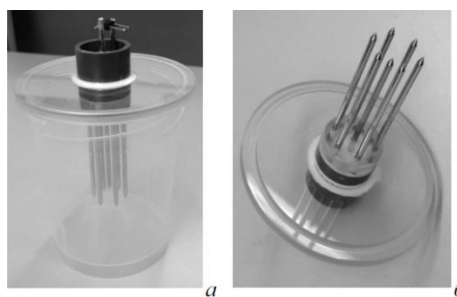


Рис. 6. Экспериментальная установка: общий вид (а) и измерительный датчик (б) [1]

Обработка результатов осуществляется при помощи эквивалентной электрической схемы измерительной ячейки и жидкости. В ней учитываются различные электрофизические параметры жидкости как чистой, так и с различными примесями (рис. 7). Из рис. 7 видно, что облепиховый напиток является более кислой средой по сравнению с остальными жид-



костями, а наименее кислотной – сливовый напиток. Из этого можно делать вывод, что с использованием устройства можно определять как кислотность среды, так и различные химические добавки в ней.

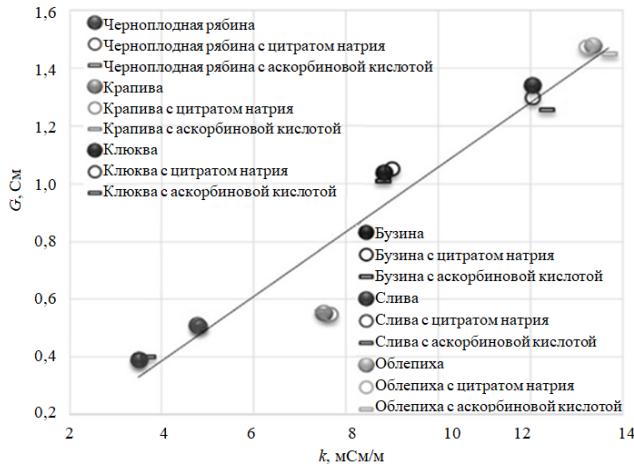


Рис. 7. Зависимость электропроводности жидкости от удельной проводимости ее компонент [1]

### Коаксиальный зонд

Поскольку подделка масла приносит экономический ущерб их производителям, то возникает необходимость в определении заявленного химического состава. В зависимости от происхождения химический состав масла отличается из-за растворенных в нем органических компонент [6]. В работе [7] предложен коаксиальный зонд, используемый для выявления наличия посторонних примесей в масле, основанный на микроволновой спектроскопии (рис. 8).

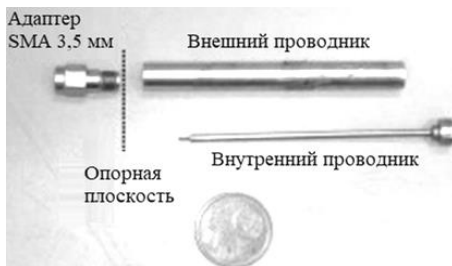


Рис. 8. Конфигурация коаксиального зонда [7]

Зонд представляет собой линию передачи, предназначенную для определения частоты релаксации ( $f_p$ ) молекул растительного масла в смесях, содержащих его (таблица).

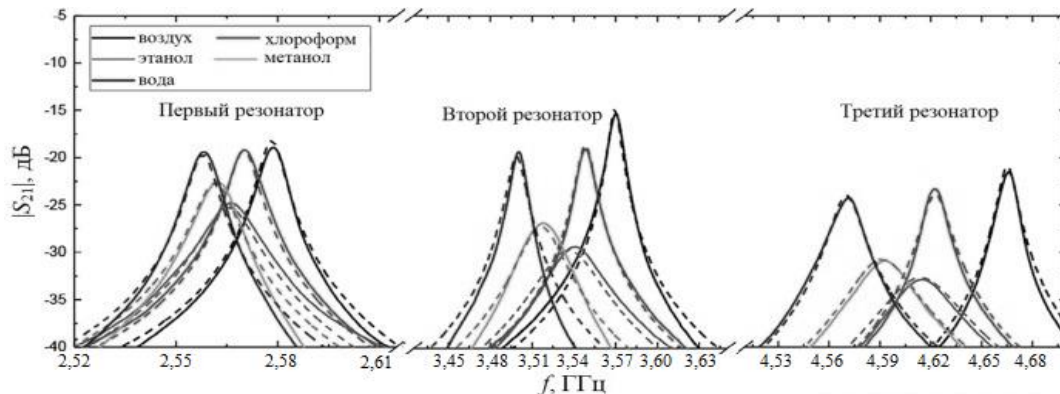


Рис. 10. Частотные зависимости  $|S_{21}|$  при пустой трубке и с жидкостями внутри неё для 25 °C [4]

### Частота релаксации молекул масла в зависимости от доли в нем подсолнечного масла

Масло	Доля подсолнечного масла, %	$f_p$ , МГц
Оливковое	0	245
Смесь 1	10	250
Смесь 2	20	257
Смесь 3	30	259
Смесь 4	40	263
Подсолнечное	100	295

Из таблицы видно, что с повышением процентного содержания подсолнечного масла в смесях происходит увеличение частоты релаксации. Поэтому, зная электрофизические параметры проверяемого продукта, можно определять наличие в нем примеси подсолнечного масла.

### Микрополосковый резонатор

В качестве компактных датчиков для определения различных типов и химических свойств жидкостей перспективно использование микрополосковых резонаторов, поскольку их параметры изменяются при контакте с различными типами диэлектриков. Так, резонансная частота резонатора зависит как от его размеров, так и от диэлектрической проницаемости его подложки. Поскольку жидкости обладают различными электрофизическими свойствами, то при их смене происходит изменение характеристик резонатора [4]. Устройство состоит из трех параллельных резонаторов, а его модель схематично показана на рис. 9.

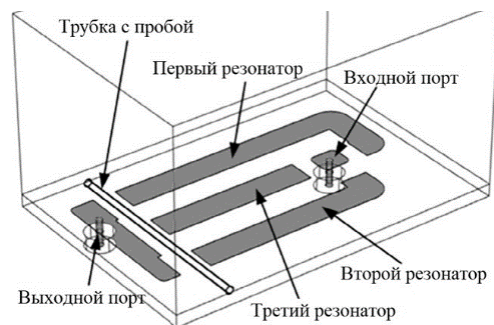


Рис. 9. Модель устройства на основе трех микрополосковых резонаторов [4]

Для исследования жидкостей применяется специальная трубка. В ходе эксперимента измеряются модули коэффициентов передачи  $|S_{21}|$  всех трех резонаторов при наличии в трубке жидкости (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что добавление жидкости в трубку приводит к изменению частот резонаторов, а также значений  $|S_{21}|$ , что обусловлено изменением диэлектрической проницаемости жидкости (рис. 11, 12).

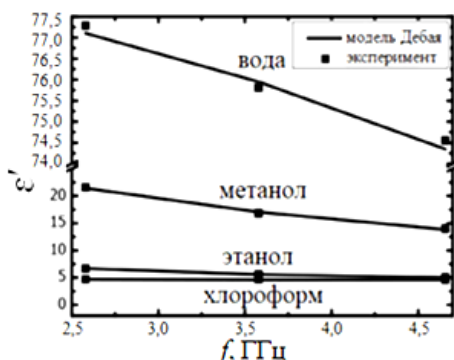


Рис. 11. Частотная зависимость реальной части диэлектрической проницаемости жидкостей [4]

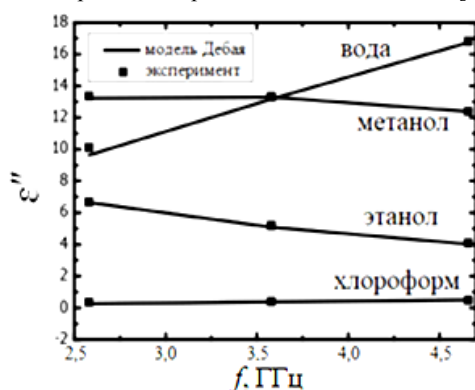


Рис. 12. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости жидкостей [4]

### Микроволновый определитель глюкозы

В работе [9] представлено устройство для определения концентрации глюкозы в крови. Модель устройства схематично показана на рис. 13, а пример его использования – на рис. 14. Из рис. 14 видно, что изменение концентрации глюкозы приводит к сдвигу резонанса  $|S_{11}|$ .

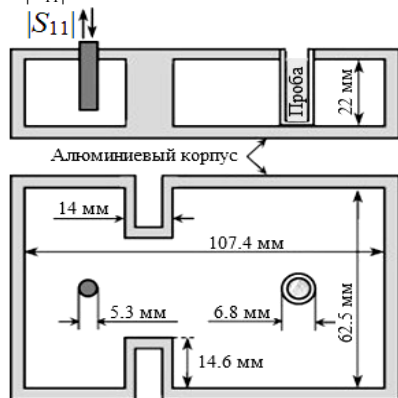


Рис. 13. Модель микроволнового устройства для определения уровня глюкозы в крови [8]

### Выводы

В работе рассмотрены различные способы определения химических и биологических компонент в жидкости. Показана применимость устройств для регистрации химического состава и выявления наличия в среде микроорганизмов.

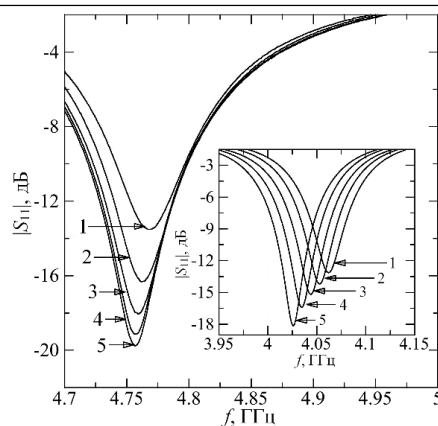


Рис. 14. Частотная зависимость  $|S_{11}|$  устройства для образцов крови свиней с концентрацией глюкозы: 1 – 1,5; 2 – 25; 3 – 3,5; 4 – 4,5; 5 – 5,5 мг/мл [9]

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0041.

### Литература

1. Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products / A. Nakonieczna, B. Paszkowski, A. Wilczek, A. Szyplowska, W. Skierucha // Food control. – 2016. – Vol. 66. – P. 116–129.
2. Sensitive, real-time and non-intrusive detection of concentration and growth of pathogenic bacteria using microfluidic-microwave ring resonator biosensor / R. Narang, S. Mohammadi, M.M. Ashani, H. Sadabadi, H. Hejazi, M.H. Zarifi, A. Sanati-Nezhad // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – 10 p.
3. Sensor for ampicillin based on a microwave electrodynamic resonator / O.I. Guliy, B.D. Zaitsev, A.V. Smirnov, O.A. Karavaeva, I.A. Borodina // Biosensors and bioelectronics. – 2019. – Vol. 130. – P. 95–102.
4. Abduljabar A.A. Multi-resonators, microwave microfluidic sensor for liquid characterization / A.A. Abduljabar, H. Hamzah, A. Porch // Microwave and optical technology letters – 2020. – Vol. 63, No. 4. – P. 1042–1047.
5. Muchammad A.A. Liquid impedance analyser for glucose concentration in water using resonance model / A.A. Muchammad, R. Sugeng, P.S. Setyawan // Microwave and optical technology letters. – 2020. – P. 1–6.
6. Lizhi H. Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition / H. Lizhi, K. Toyoda, I. Ihara // Journal of food engineering. – 2008. – Vol. 88, No. 2. – P. 151–158.
7. Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy / A. Cataldo, E. Piuze, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone // Measurement. – 2010. – Vol. 43, No. 8. – P. 1031–1039.
8. Noninvasive in vitro measurement of pig-blood d-glucose by using a microwave cavity sensor / K. Seungwan, M. Harutyun, K. Jongchel, B. Arsen, L. Jung-Ha, E. Lkhamsuren, F. Barry, L. Kiejin // Diabetes research and clinical practice. – 2012. – Vol. 96, No. 3. – P. 379–384.

### Невежин Виталий Николаевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-2257-7690  
Эл. почта: vitalayzerman@mail.ru

### Бусыгина Анна Владимировна

Ст. преп. каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-2150-5396  
Эл. почта: bav-tusur@mail.ru

**В.А. Семенюк, М.Е. Комнатнов, А.В. Демаков**

## Исследование излучаемой эмиссии микроконтроллеров при температурном воздействии

Представлены результаты исследования излучаемой эмиссии группы микроконтроллеров в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при температурном воздействии. Выполнена сборка установки для измерения излучаемой эмиссии на основе климатической и ТЕМ-камер. Выполнены измерение и анализ эмиссии микроконтроллеров при изменении температуры в диапазоне от  $-50$  до  $+150$  °С.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, интегральная схема, микроконтроллер, излучаемая эмиссия, ТЕМ-камера.

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) используются во всех сферах современного общества. Совершенствование электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой при разработке различных РЭС, направлено на повышение быстродействия, уровня интеграции, а также снижение значений питающих напряжений. Увеличение рабочих частот и переход с микронных технологий производства на субмикронные [1] приводят к повышению восприимчивости ЭКБ [2, 3] к внешнему электромагнитному полю и увеличению амплитуд излучаемых эмиссий РЭС.

Активно исследуются подходы, направленные на уменьшение амплитуд излучаемых эмиссий от ИС. Использование поверхностно-монтажных корпусов ИС, таких как BGA [4], позволило снизить уровень излучаемых эмиссий за счёт минимизации длины выводов корпуса. Также известно применение радиопоглощающих материалов при корпусировании ИС для рассеяния эмиссии в тепло [5]. В то же время температура окружающей среды может оказывать влияние на рабочие характеристики ИС, в том числе на уровни излучаемой эмиссии и восприимчивости к помехам [6]. В связи с этим актуально проведение совместных испытаний ИС на климатические и электромагнитные воздействия [7, 8].

Целью данной работы является исследование влияния температурного воздействия на излучаемую эмиссию группы МК на базе ARM Cortex M3.

### Описание экспериментальной установки

Для исследования температурного воздействия на излучаемые эмиссии группы МК на базе ядра Cortex M3 (K1986VE91T, K1986VE92Q1) собрана измерительная установка на основе ТЕМ-камеры [9], используемой для испытаний ИС согласно стандартам [10, 11]. ТЕМ-камера представляет собой устройство на основе линии передачи, конструкция которой состоит из регулярной части волновода с расположенным внутри центральным проводником, которая соединяется с СВЧ соединителями с помощью согласующих переходов. Для измерения излучаемой эмиссии ИС устанавливаются на измерительной печатной плате (ПП) и помещаются во внутренний объем камеры в её регулярной части [12]. Напряжение питания 5 В подается на измерительную ПП через соединитель USB от АКБ, после чего выполняется проверка корректности функционирования МК и выполняемой им

задачи [13]. С помощью измерительного приёмника (ИП) Rohde&Schwarz ESRP 7 выполнялось измерение напряжений на входе ТЕМ-камеры, характеризующее эмиссию от ИС. Для обеспечения температурного воздействия ТЕМ-камера с ИС помещалась в промышленную камеру тепло/холод «Espec SU-262» [14] (рис. 1).

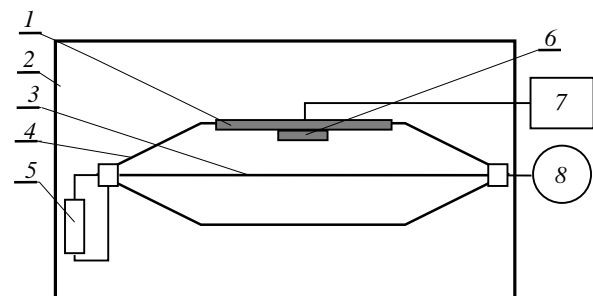


Рис. 1. Структурная схема установки для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС:

1 – ПП, 2 – камера тепло/холод, 3 – центральный проводник, 4 – ТЕМ-камера, 5 – согласованная нагрузка, 6 – МК, 7 – АКБ, 8 – ИП

Измерения эмиссий проводились в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при воздействии температуры от  $-50$  до  $+150$  °С. Установка для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС приведена на рис. 2.

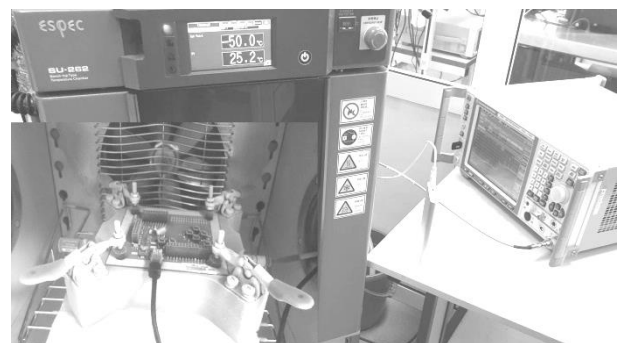


Рис. 2. Установка для совместных климатических и электромагнитных испытаний ИС в диапазоне температур от  $-50$  до  $+150$  °С

Для группы МК (рис. 3) разработана тестовая программа, выполняющая тактирование МК от внешнего тактового генератора на частоте 80 МГц, конфи-

гурацию портов ввода / вывода на выход в цифровом режиме и настройку таймеров в режим генерации ШИМ с частотой 50 кГц со скважностью 2, 4 и 8 по трём его каналам.

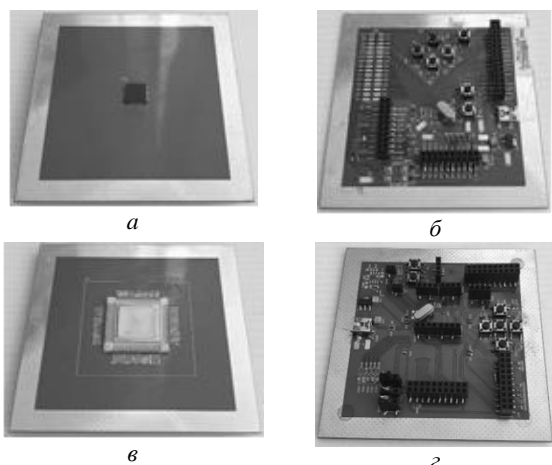


Рис. 3. Общий вид измерительных ПП с МК K1986BE92QI (а, б), K1986BE91T (в, г)

**Измерение и анализ излучаемой эмиссии**

Приведены измеренные частотные зависимости напряжения на входе ИП  $U$  при температурах  $-50$ ,  $+20$  и  $+150$  °C (рис. 4).

Максимальные значения эмиссий дополнительно сведены в табл. 1 и 2.

Из измеренных зависимостей  $U$  для МК K1986BE91T наблюдается увеличение значения  $U$  в диапазоне частот 9–28 МГц, что вызвано формированием ШИМ-сигналов (рис. 4, а).

Таблица 1

**Максимальные значения  $U$  в диапазоне частот 0,15–32 МГц**

МК	Температура, °C	Уровень $U$ , дБ	Частота, МГц
K1986BE91T	-50	18,2	10
	+20	10,5	10
	+150	12,6	10
K1986BE92QI	-50	19,2	9
	+20	12,6	4
	+150	14,6	4

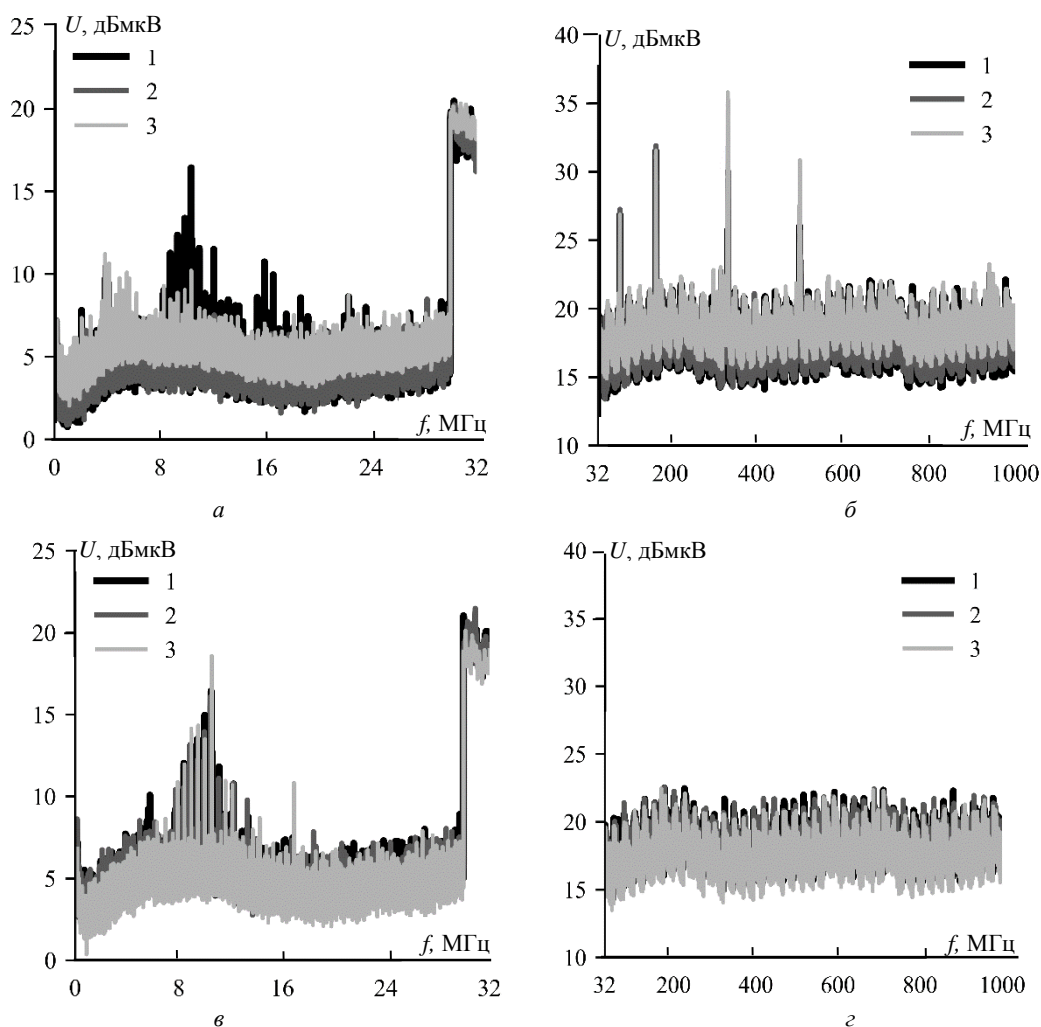


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости  $U$  в диапазонах частот 0,15–32 МГц (а, в) и 32–1000 МГц (б, г) при функционировании МК K1986BE91T (а, б) и K1986BE92QI (в, г) при температуре:  $-50$  °C (1),  $+20$  °C (2) и  $+150$  °C (3)

При температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  уровень  $U$  максимален и составляет 18,2 дБ вблизи 10 МГц, а увеличение температуры до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению  $U$  до 12,6 дБ (см. табл. 1).

Увеличение напряжения на 20 дБ на частотах выше 30 МГц вызвано работой преселектора ИП. В диапазоне частот 32–1000 МГц наблюдается увеличение  $U$  до 26–36 дБ вблизи частоты тактирования МК 80 МГц и кратных ей гармоник (160, 334, 495 МГц) (см. рис. 4, б). Видно, что существенное различие уровня излучаемой эмиссии наблюдается на частотах 4-й и 5-й гармоник тактовой частоты МК. Увеличение температуры от  $-50$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению  $U$  с 36 до 31,5 дБ вблизи 334 МГц и уменьшению уровня напряжений 30 до 26,4 дБ вблизи 495 МГц. При увеличении температуры до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается снижение  $U$  с 31,5 до 27,4 дБ вблизи 334 МГц и с 26,4 до 23,5 дБ вблизи 495 МГц (см. табл. 2).

Таблица 2

**Максимальные значения  $U$   
в диапазоне частот 32–1000 МГц**

МК	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Уровень $U$ , дБ	Частота, МГц
K1986BE91T	$-50$	36	336
	$+20$	31,5	334
	$+150$	27,4	334
K1986BE92QI	$-50$	24	160
	$+20$	23	160
	$+150$	23	724

Из полученных зависимостей  $U$  для МК K1986BE92QI в диапазоне 0,15–32 МГц (см. рис. 4, в) видно увеличение амплитуды максимальной излучаемой эмиссии вблизи частоты 10 МГц на 10–15 дБ. Это также наблюдалось в результатах измерений первого МК и объясняется работой блока формирования ШИМ-сигналов. При температуре минус  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  на частоте 10 МГц наблюдается максимальное значение  $U = 19,2$  дБ, однако с ростом температуры до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  значение  $U$  снижается до 14,6 дБ. Спектр эмиссии данного МК сосредоточен в диапазоне частот 8–12 МГц, причем максимальное значение  $U$  варьируется в пределах 8–19 дБ во всем диапазоне температур. На частотах 16–32 МГц эмиссии сопоставимы по уровню с шумом на входе ИП. Из рис. 4, г видно, что изменение температуры не оказывает существенного влияния на уровень  $U$  в диапазоне частот 32–1000 МГц, при этом максимальное значение  $U$  составляет 24 дБ вблизи частоты 160 МГц (см. табл. 2).

### Заключение

Представлены результаты измерений излучаемой эмиссии группы МК на базе ядра Cortex M3 в диапазоне частот от 50 кГц до 1 ГГц при изменении температуры от  $-50$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Выявлено, что для МК K1986BE91T увеличение эмиссии в диапазоне частот 9–28 МГц вызвано формированием ШИМ-сигналов, а также работой блока тактирования МК. При изменении температуры от  $-50$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  значение  $U$  в диапазоне частот 9–28 МГц снижается с 18,2 до 12,6 дБ, а вблизи частоты 334 МГц – уменьша-

ется с 36 до 27,4 дБ. Для МК K1986BE92QI наблюдается схожий характер частотных зависимостей эмиссии в диапазоне частот 50 кГц – 30 МГц с максимальным значением  $U = 19,2$  дБ. Показано, что на частотах выше 30 МГц изменение температуры не оказывает существенного влияния на уровень эмиссии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

### Литература

1. Theis T.N. The end of Moore's law: a new beginning for information technology / T.N. Theis, H.-S.C. Wong // Computing in science and engineering. – 2017. – Vol. 19, No. 2. – P. 41–50.
2. Ключник А.В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения / А.В. Ключник, Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug10/3/text.html> (дата обращения: 5.09.2021).
3. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/15/text.html#6> (дата обращения: 5.09.2021).
4. Tu M.-H. Electromagnetic interference measurement study in BGA package / M.-H. Tu, R.-F. Hsu, S.-M. Wu, C.-C. Chen // Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). – 2015. – P. 219–222.
5. Piersanti S. Near field shielding performances of absorbing materials for integrated circuits (IC) applications, part I: lateral excitation / S. Piersanti, A. Orlandi, F. Paulis, S. Connor, M.A. Khorrami, C. Dixon, B. Archambeault, J.L. Drewniak // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 60, No. 1. – P. 188–195.
6. Dienot J., Batista E., Ramos I. Thermal-electromagnetic susceptibility behaviors of PWM patterns used in control electronic circuit // 2015 10th International workshop on the electromagnetic compatibility of integrated circuits (EMC Compo). – IEEE, 2015. – P. 190–195.
7. Dienot J.M., Batista E., Bernard M. Dual experimental approach for thermal impacts on electromagnetic behavior of electronic circuit board configurations // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2008. – Vol. 57, No. 11. – P. 2405–2413.
8. Dhia S.B. et al. Thermal influence on 16-bits microcontroller emission // 2007 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – IEEE, 2007. – P. 1–4.
9. Патент на изобретение № 2727075. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. // Заявка № 2019140183. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубл. 17.07.2020. Бюл. № 20.
10. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (дата обращения: 05.09.2020).
11. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (дата обращения: 05.09.2020).

12. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость // А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов / Доклады ТУСУР. – 2018. – № 1 (21). – С. 52–56.

13. Demakov A.V. Research of Radiated Emissions of a Microcontroller Using Various Power Supplies / A.V. Demakov, V.A. Semenjuk, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – P. 1–4.

14. Bench-Top Type Temperature (& Humidity) Chamber. URL: <https://www.espec.de/products/compact/bench-top-type-temperature-humidity-chamber/> (дата обращения: 01.10.2021).

**Семенюк Валерий Александрович**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: valera\_student@cloud.com

**Комнатнов Максим Евгеньевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: maxmek@mail.ru

**Демаков Александр Витальевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: vandervals@inbox.ru

П.А. Попов, Т.И. Третьяков, А.В. Демаков

## Разработка измерительных печатных плат для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость в ТЕМ-камере

Представлены результаты разработки печатных плат для измерения излучаемых эмиссий интегральной схемы STM32F103C8T6 и  $S$ -параметров микрополосковой и копланарной линий передачи в ТЕМ-камере. Выполнен анализ требований к измерительным платам на основе действующих стандартов испытаний в ТЕМ-камере и приведены особенности их разработки. Представлены результаты измерений эмиссии интегральной схемы и  $S$ -параметров линий передачи, выполненных на основе разработанных плат.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, интегральная схема, испытательная плата.

Для измерения уровня излучаемых электромагнитных эмиссий и восприимчивости интегральных схем (ИС) широкое применение получил метод измерения в ТЕМ-камере [1]. Данные измерения проводятся согласно нормативным документам [2, 3], которые также содержат требования к измерительной установке. Для проведения измерений в ТЕМ-камере [4] исследуемый объект устанавливается на измерительную печатную плату (ПП), размещаемую в апертуре камеры. Исследуемый объект размещается во внутреннем пространстве ТЕМ-камеры, при этом образуя электромагнитную связь с ее центральным проводником. Излучаемые эмиссии от объекта представляются в виде частотных зависимостей напряжения на входе ТЕМ-камеры.

При этом токоведущие проводники и электронные компоненты, размещаемые на измерительной ПП для обеспечения работы исследуемого объекта, также могут вносить свой вклад в измеряемый уровень эмиссии. В то же время измерительная ПП представляет собой электромагнитный экран для снижения влияния внешних электромагнитных помех на результаты измерений. В рамках исследований излучаемых эмиссий с помощью ТЕМ-камеры требуется разработка измерительных ПП для ИС, микрополосковой (МЛП) и копланарной (КЛП) линий передачи в соответствии с требованиями [2, 3].

Цель работы – разработать измерительные ПП для проведения исследований излучаемых эмиссий от ИС, МЛП и КЛП в ТЕМ-камере.

### Требования стандартов испытаний к измерительным платам

Согласно требованиям нормативных документов [2, 3], размеры измерительной ПП для ИС должны составлять  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  при наличии не менее четырех проводящих слоев. Два внутренних слоя ПП используются в качестве сигнальных проводников, а два внешних слоя имеют сплошные полигоны заземления. Края внешнего слоя ПП со стороны размещения ИС представляют собой сплошные полигоны заземления для обеспечения электрического контакта ПП с внешним проводником ТЕМ-камеры для обеспечения экранирования. С обратной стороны ПП размещаются периферийные устройства, необходимые для работы ИС, при этом переходные металлизированные отверстия располагаются под выводами ИС (рис. 1).

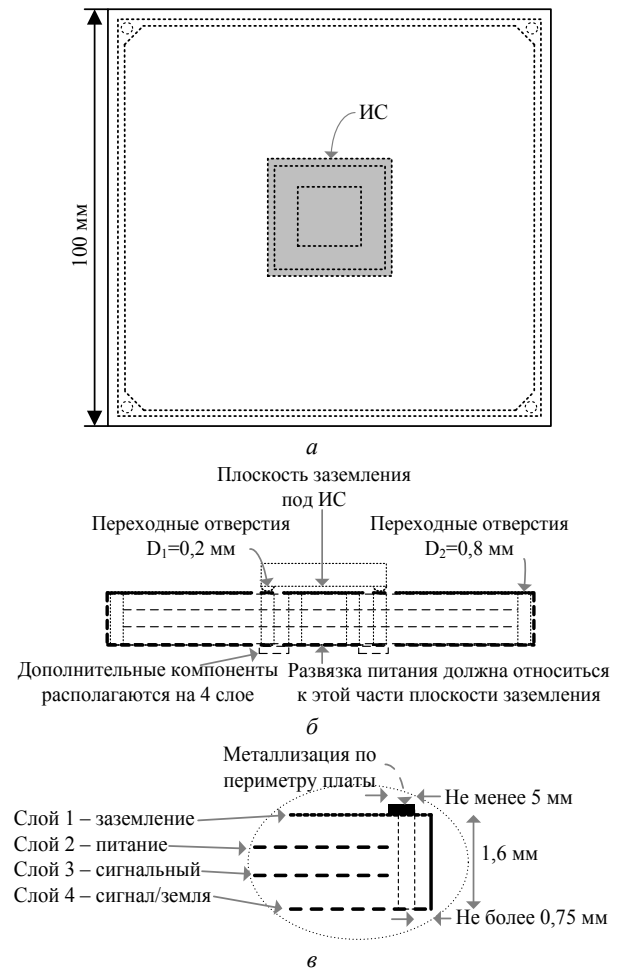


Рис. 1. Структура измерительной платы: вид сверху (а), вид сбоку (б), поперечное сечение (в)

Длина трасс, размещение и ориентация компонентов должны быть оптимизированы с целью минимизации площади контуров протекания токов. Диаметры переходных отверстий, расположенных под выводами ИС и по краям ПП, должны составлять не менее  $D_1 = 0,2 \text{ мм}$  и  $D_2 = 0,8 \text{ мм}$  соответственно. Переходные отверстия, соединяющие плоскости заземления на первом и четвертом слое ПП, должны находиться на расстоянии не более 10 мм. Переходные отверстия, соединяющие сигнальные трассы, должны располагаться как можно ближе к переходным отвер-

ствиям, соединяющим полигоны «земли», для уменьшения пути протекания обратных токов.

Развязка по электропитанию ИС должна быть выполнена в соответствии с рекомендациями производителя. Блокировочные конденсаторы по питанию должны быть подключены к полигону «земли» в непосредственной близости от ИС.

Импеданс источника питания платы может оказать влияние на результаты измерений в случае, если развязка источника питания не рассчитана должным образом. Для контроля импеданса питания для любого внешнего источника питания ПП должна иметь группу развязывающих конденсаторов.

**Разработка измерительной ПП для ИС STM32F103C8T6**

Выполнена разработка структурной схемы измерительной ПП для проведения испытаний микроконтроллера STM32F103C8T6 на излучаемые эмиссии. Напряжение питания 5 В поступает через разъем mini USB. Для работы ИС необходимо напряжение 3,3 В, которое поступает с выхода стабилизатора напряжения. Фильтр Ф1 предотвращает возникновение пульсаций напряжения на входе стабилизатора, а фильтр Ф2 поддерживает стабильность напряжения на выходе стабилизатора. Отладочные интерфейсы SW/JTAG используются для отладки ИС. Устройства ввода и вывода предназначены для подключения внешних устройств к испытательной плате. Тактовый генератор обеспечивает точность и стабильность опорной частоты, а также синхронизацию ИС с внешними устройствами (рис. 3).

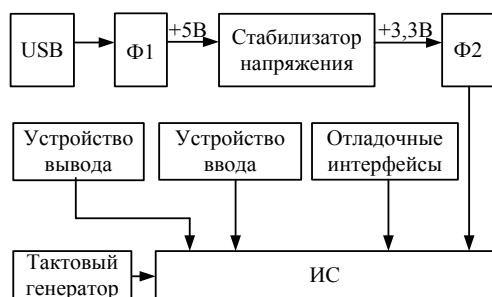
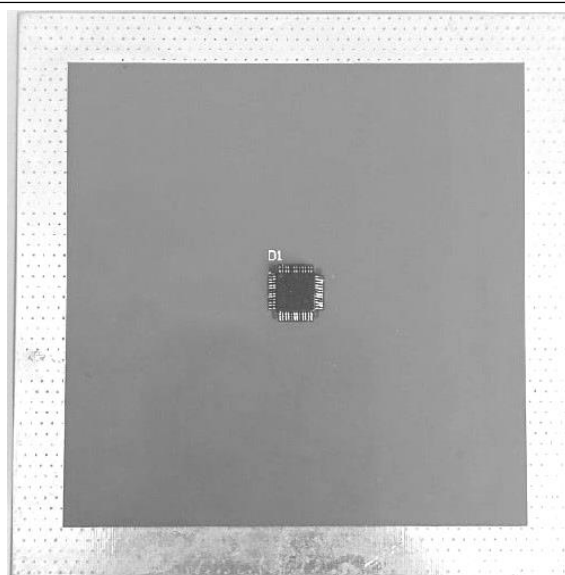


Рис. 2. Структурная схема измерительной ПП

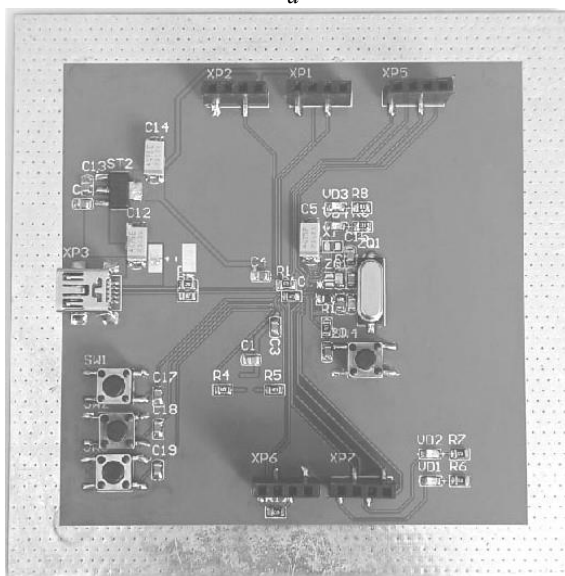
На основе предъявляемых требований и разработанной структурной схемы создана измерительная ПП, лицевая и обратная стороны которой приведены на рис. 3.

**Разработка измерительных ПП с линиями передачи**

Для исследования электромагнитной связи объекта испытания в виде линии передачи и внутреннего проводника ТЕМ-камеры согласно аналогичным требованиям разработаны две измерительные ПП с МЛП и КЛП. В качестве диэлектрика ПП использован стеклотекстолит ( $\epsilon_r = 4,5$ ) толщиной  $h = 1,6$  мм при толщине проводников  $t = 0,035$  мм. Ширина активного проводника для МЛП  $w_1 = 3,256$  мм, а для КЛП –  $w_2 = 2,65$  мм при значении ширины зазора  $s_1 = 0,8$  мм (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Измерительная ПП для ИС STM32F103C8T6: лицевая (а) и обратная (б) стороны

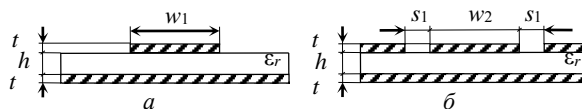


Рис. 4. Поперечные сечения МЛП (а) и КЛП (б)

Для подключения МЛП и КЛП к измерительному оборудованию использованы коаксиально-волноводные переходы (КВП) ПКМ2-40-05P-0,3Ф2 (рис. 5).

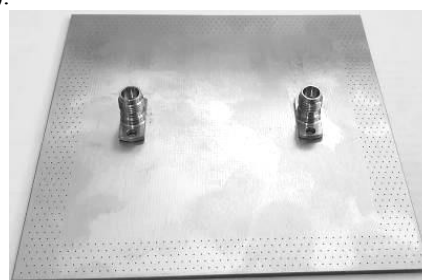


Рис. 5. Сборка КВП и измерительной ПП



На рис. 6 приведены лицевые стороны измерительных ПП с МЛП и КЛП.

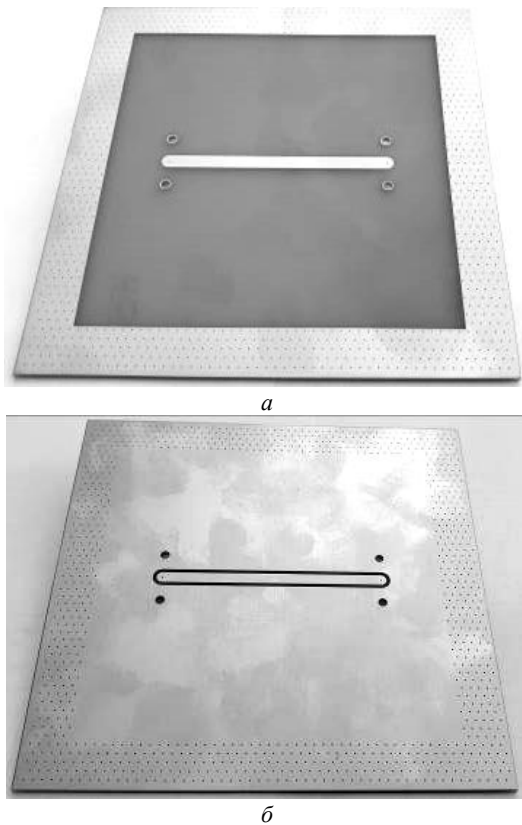


Рис. 6. Измерительные ПП с МЛП (а) и КЛП (б)

### Результаты измерений

Выполнено измерение излучаемой эмиссии ИС STM32F103C8T6 при помощи измерительного приемника (ИП) R&S ESPR 7 и ТЕМ-камеры [5, 6] с диапазоном частот от 50 кГц до 5,2 ГГц. Получены частотные зависимости напряжения на входе ИП в диапазоне частот от 0,15 до 100 МГц. Наблюдается незначительное увеличение уровня эмиссии до 10 дБ вблизи частоты 60 МГц. Максимальный уровень эмиссии  $U = 16,2$  дБмкВ наблюдается вблизи частоты тактирования ИС 72 МГц. При этом на остальных частотах эмиссии сопоставимы по уровню с шумом ИП (рис. 7).

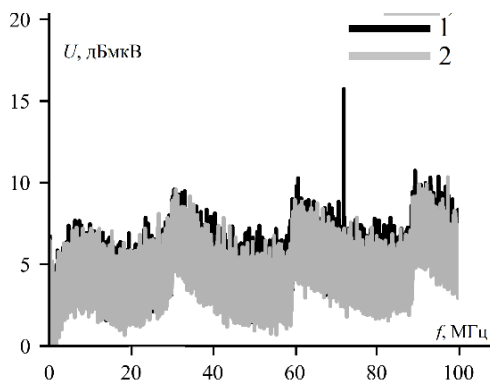


Рис. 7. Частотные зависимости напряжения эмиссии на входе ТЕМ-камеры, полученные при функционировании (1) и при выключенной (2) ИС

С помощью скалярного анализатора цепей измерены частотные зависимости модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  от входа МЛП и коэффициента передачи  $|S_{21}|$  между ТЕМ-камерой и МЛП (рис. 8). Из полученных зависимостей наблюдается рассогласование МЛП с измерительным трактом 50 Ом на частотах 0,8–2,5 ГГц с максимальным значением  $|S_{11}| = -5$  дБ вблизи 2,1 ГГц, при этом значения  $|S_{21}|$  не превышают уровня  $-18$  дБ до 5,2 ГГц. В области частот выше 5,2 ГГц наблюдается рост числа резонансов на зависимостях  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$ , вызванных возбуждением в ТЕМ-камере высших типов волн.

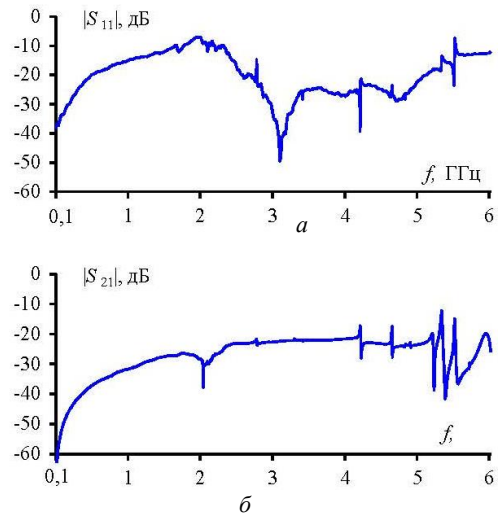


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  (б) МЛП

Далее выполнены аналогичные измерения  $S$ -параметров КЛП в ТЕМ-камере (рис. 9). Из полученных результатов наблюдается согласование КЛП с измерительным трактом на частотах до 5,2 ГГц при  $|S_{11}|$  не более  $-13$  дБ и  $|S_{21}|$  не более  $-25$  дБ. На частотах выше 5,2 ГГц также наблюдается рост числа резонансов зависимостей  $|S_{11}|$  и  $|S_{21}|$  из-за возбуждения высших типов волн.

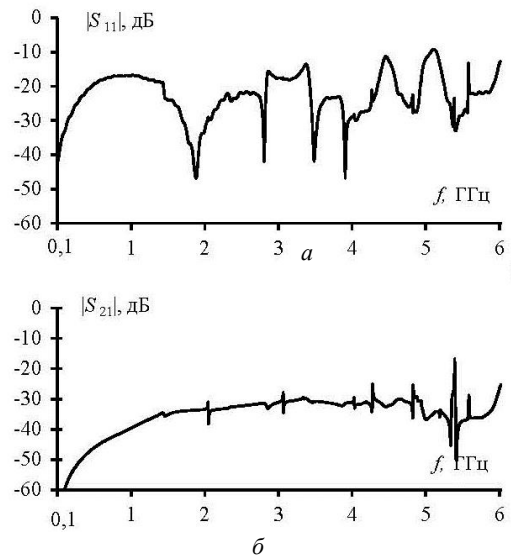


Рис. 9. Измеренные частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  (б) КЛП

**Заключение**

Выполнен анализ требований к измерительным ПП на основе действующих стандартов испытаний ИС в ТЕМ-камере. Представлены результаты измерений эмиссии ИС и S-параметров МЛП и КЛП, выполненных с помощью разработанных ПП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162).

**Литература**

1. Deng S. Mode suppressed TEM cell design for high frequency IC measurements / S. Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, J. Drewniak, D. Beetner, D. Shin, S. Kim, H. Kwak // IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – 2007. – P. 1–6.

2. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edition, 2005.

3. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edition, 2010.

4. Пат. 2727075 РФ, ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов. – 2019140183; Заяв. 09.12.2019; Опубл. 17.07.20.

5. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 52–56.

6. Demakov A.V. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk, 2017. – P. 399–402.

**Попов Павел Андреевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: ronot88@gmail.com

**Третьяков Тимур Игоревич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: henos19039@gmail.com

**Демаков Александр Витальевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

ORCID: 0000-0002-5672-5911

Эл. почта: vandervals@inbox.ru

А. Секенова, А.А. Иванов

## Моделирование эффективности экранирования многослойных экранов на основе металлов и полимерных композитных материалов

Выполнены программная реализация и тестирование аналитических математических моделей для вычисления эффективности экранирования (ЭЭ) экранов из металлов и полимерных композитных материалов. В диапазоне частот 0–5 ГГц вычислены частотные зависимости ЭЭ многослойных электромагнитных экранов из тонких пленок меди и алюминия, нанесенных на основания из ферритового композита и стеклотекстолита. Показано, что изменение материала основания экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить его ЭЭ на 32 дБ.

**Ключевые слова:** эффективность экранирования, многослойный экран, металлы, композитные материалы.

Электромагнитное экранирование широко применяется для защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Как правило, проектирование электромагнитных экранов сводится к оценке их эффективности экранирования (ЭЭ) [1]. При этом на ранних стадиях проектирования РЭС для получения ЭЭ наиболее целесообразно использовать аналитические модели, поскольку они требуют минимальных вычислительных затрат [2].

В последние годы металлы и их сплавы, традиционно используемые для изготовления экранирующих конструкций РЭС, заменяются на полимерные композитные материалы, обладающие значительно меньшим весом, но менее высокой ЭЭ. Одним из возможных вариантов преодоления этих недостатков является создание многослойных электромагнитных экранов на основе различных сочетаний композитов и металлов. Цель данной работы – выполнить оценку ЭЭ таких экранов.

### Выбор аналитической модели

Большая часть существующих аналитических моделей предназначена для вычислений ЭЭ плоских экранов, выполненных либо из металлов, либо из композитов [3–9]. Однако известны модели, которые могут быть объединены и использованы для оценки ЭЭ многослойного экрана, состоящего одновременно из металлов и композитов [10, 11].

Согласно [10, 11], плоский однородный экран толщиной  $t$  при воздействии на него плоской электромагнитной волны (ПЭМВ) может быть представлен в виде отрезка двухпроводной линии передачи (ЛП) длиной  $t$ , характеризующейся волновым сопротивлением  $Z$  и продольным волновым числом  $\gamma$ . При этом, исходя из эквивалентности телеграфных уравнений и уравнений Максвелла для гармонических колебаний, для вычисления ЭЭ в [10, 11] используются токи и напряжения в ЛП. Если экран состоит из  $n$  слоев, то он заменяется каскадным соединением  $n$  отрезков ЛП (рис. 1). В этом случае для расчета токов и напряжений используется  $A$ -форма записи параметров четырехполюсников.

Для набора из  $n$  отрезков ЛП матрица  $A$ -параметров определяется как [10, 11]

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i t_i & \sinh \gamma_i t_i \\ \frac{\sinh \gamma_i t_i}{Z_i} & \cosh \gamma_i t_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Если  $n$ -й слой экрана выполнен из металла или сплава, то  $Z$  и  $\gamma$  могут быть вычислены как [10]

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_r}{\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r}}, \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_r(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  – магнитная и электрическая постоянные,  $\omega$  – частота источника ПЭМВ,  $\mu_r$  и  $\epsilon_r$  – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала,  $\sigma$  – удельная проводимость материала.

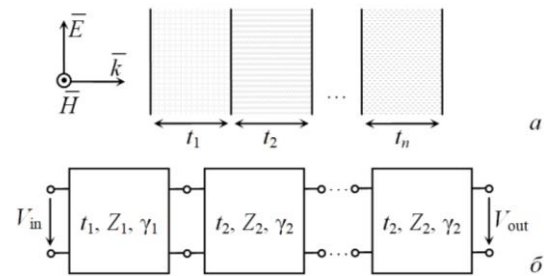


Рис. 1. Многослойный экран (а) и его эквивалентная схема для вычисления ЭЭ (б)

Для  $n$ -го слоя экрана, выполненного из композитного материала,  $Z$  и  $\gamma$  определяются как [11]

$$Z = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{\sigma}}, \quad (4)$$

$$\gamma = j \sqrt{\omega\mu_0\mu_r(\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon')}, \quad (5)$$

где  $\epsilon'$  – реальная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала. ЭЭ рассчитывается как коэффициент передачи между входом и выходом эквивалентной схемы экрана из  $n$  отрезков ЛП как

$$\text{ЭЭ} = 20 \lg \left| \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} \right| = 20 \lg \left| \frac{a_{21} Z_0^2 + a_{22} Z_0 + a_{11} Z_0 + a_{12}}{2 Z_0} \right|, \quad (6)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства,  $V_{\text{in}}$ ,  $V_{\text{out}}$  – входное и выходное напряжения в эквивалентной схеме.

**Тестирование модели**

Выполнена программная реализация моделей из [10, 11] в среде GNU Octave. Для тестирования модели из [10] в диапазоне частот от 10 МГц до 1 ГГц вычислена ЭЭ двухслойного экрана из меди ( $\sigma = 56,6$  МСм/м,  $\mu_r = \epsilon_r = 1$ ) и стали ( $\sigma = 10,3$  МСм/м,  $\mu_r = \epsilon_r = 1$ ) при  $t_1 = t_2 = 1$  мм. Сравнивались результаты вычислений с помощью [10] и модели из [12]. Полученные частотные зависимости ЭЭ приведены на рис. 2. Видно, что они согласуются, а отличие не превышает 3%.

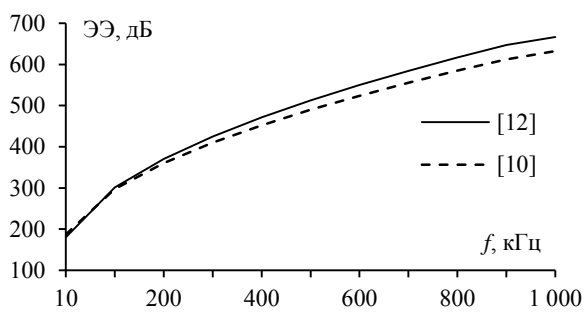


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ двухслойного экрана из стали и меди

Выполнено тестирование реализованной модели из [11]. Для этого в диапазоне частот 0–5 ГГц вычислены частотные зависимости ЭЭ для двухслойного экрана из полимерных композитов с  $t_1 = t_2 = 2$  мм,  $\mu_{r1} = 20$ ,  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\mu_{r2} = 1$  и  $\epsilon_{r2} = 20$ . При тестировании сравнивались результаты, полученные реализованной моделью и с помощью численного метода конечных разностей во временной области (МКРВО). При вычислениях по МКРВО использовалась электродинамическая модель коаксиальной камеры с конструкцией из рис. 3, соответствующей стандартам ASTM ES7 и ASTM B4935. Вычисленные частотные зависимости ЭЭ представлены на рис. 4. Видно, что они хорошо согласуются, при этом отличие не превышает 0,2 дБ.

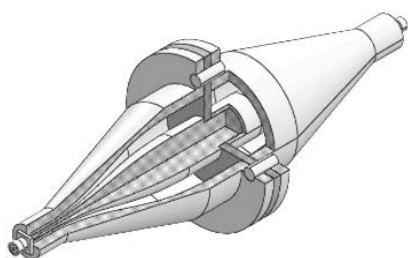


Рис. 3. Электродинамическая модель коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных материалов

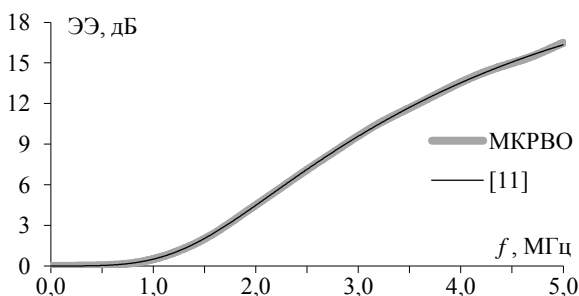


Рис. 4. Частотные зависимости ЭЭ двухслойного композитного экрана

Полученные результаты подтверждают, что модели из [10, 11] являются корректными и пригодны для оценки ЭЭ многослойных электромагнитных экранов с приемлемой точностью.

**Вычисление ЭЭ многослойных экранов**

Объединив модели из [9, 10], в диапазоне частот 0–5 ГГц выполнено моделирование ЭЭ многослойных экранов из тонких металлических пленок (18 мкм), нанесенных на композитные основания. В качестве материалов для пленок использовались медь (М) и алюминий (А) с  $\sigma = 37$  МСм/м,  $\mu_r = \epsilon_r = 1$ . Для оснований использовались листы толщиной 1 мм, выполненные из стеклотекстолита (С) с  $\epsilon_r = 4,3 + 0,086j$  и  $\mu_r = 1$  и полимерного композита (К) с ферритовыми частицами с  $\epsilon_r = 9,1 + 0,4j$  и  $\mu_r = 0,8 + 0,9j$ . Вычисленные частотные зависимости ЭЭ для различных сочетаний материалов представлены на рис. 5.

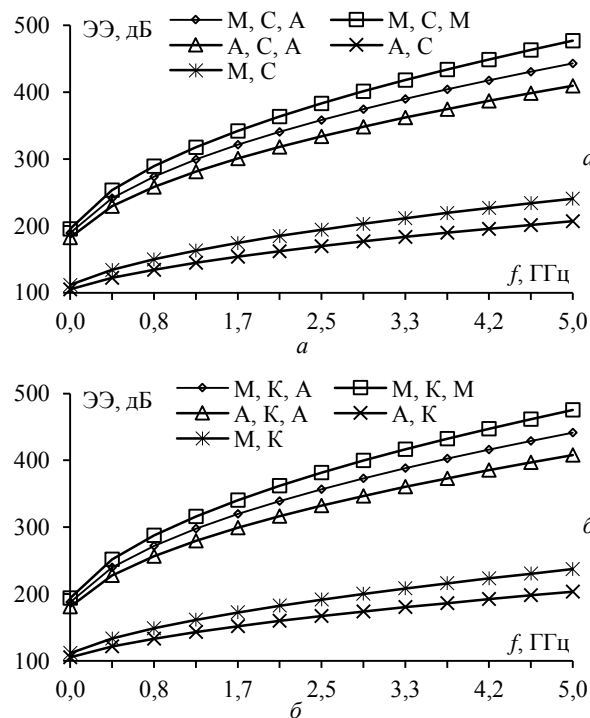


Рис. 5. Частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов из тонких пленок меди и алюминия, нанесенных на основания из стеклотекстолита (а) и полимерного композита (б)

Из рис. 6 видно, что ЭЭ увеличивается с ростом частоты для всех рассмотренных экранов.

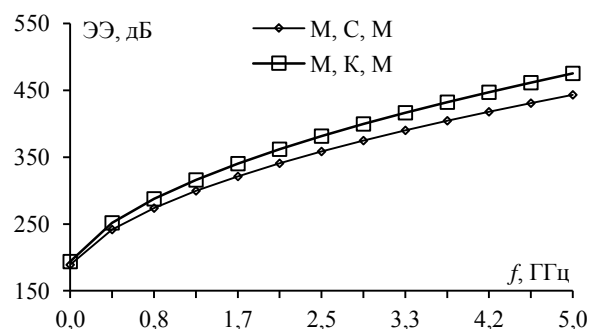


Рис. 6. Сравнение частотных зависимостей ЭЭ многослойных экранов с разными материалами основания

При этом наилучшую ЭЭ (свыше 440 дБ на частоте 500 МГц) имеют экраны с конструкциями М, К, М и М, С, М. Для наглядности на рис. 6 приведено сравнение частотных зависимостей ЭЭ этих конструкций. Видно, что изменение материала основания экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить ЭЭ многослойного экрана на 32 дБ.

#### Заключение

Выполнены программная реализация и тестирование аналитических математических моделей для оценки ЭЭ электромагнитных экранов из металлов и композитных материалов. Вычислены частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов из тонких алюминиевых и медных пленок, нанесенных на основания из стеклотекстолита и полимерного композита с ферритовыми частицами. Выявлены конструкции экранов, обладающие наибольшей ЭЭ. Показано, что изменение материала основания многослойного экрана со стеклотекстолита на композит позволяет увеличить его ЭЭ на 32 дБ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

#### Литература

1. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. – М.: Грифон, 2019. – 720 с.
2. Комнатнов М.Е. Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07, 05.12.04. – Томск, 2016. – 216 с.
3. A Multi-stage model for the electromagnetic shielding effectiveness prediction of an infinite conductor plane with periodic apertures / B. Wanxin, G. Anqi, T. Li et al. // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 61896–61903.
4. Park H.H. Low-frequency magnetic shielding analysis of a metal plate without and with a slot / H.H. Park, H.J. Know // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE). – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019.
5. Measurements and power balance calculations of the shielding effectiveness of partitioned equipment enclosures / A.C. Marvin, S.L. Parker, J.F. Dawson et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 158–162.

6. Shielding effectiveness assessment of a coaxial cable design with a combination of numerical and analytical solutions / P. Clement, P.V. Tan, X. Pascal et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 1061–1065.

7. Harberts D.W. LF scattering of a cylindrical shield in an alternating magnetic field / D.W. Harberts, P. Geran, M. van Helvoort // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 456–461.

8. Shielding characterization of metallic enclosures with multiple slots and a thin-wire antenna loaded: multiple oblique EMP incidences with arbitrary polarizations / Q.F. Liu, W.Y. Yin, M.F. Xue et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. – P. 284–292.

9. Modified Shielding Effectiveness Equation for Novel Multilayered Waveguide-Below-Cutoff Array / Hwang Jung-hwan, Park Hyun-ho, Kwak Sang-il et al. // Proceeding of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility and Asia-Pacific symposium on electromagnetic compatibility. – Singapore, Singapore, 14–18 May 2018.

10. Dan S. Low thermal-resistance silicon-based substrate for light-emitting diode packaging / S. Dan, G. Yougang, S. Yougang // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 5, No. 10. – P. 1–6.

11. Analytical model and software for evaluating the shielding materials properties / A.A. Ivanov, A.A. Kvasnikov, I.A. Onishchenko et al. // Proceeding of IEEE International conference of young professionals on electron devices and materials. – Gorno-Altaysk, Russia, 30 June–4 July 2021. – P. 1–6.

12. Schulz R.B. Shielding theory and practice / R.B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1988. – Vol. 30, No. 3. – P. 187–201.

#### Секенова Айтгул

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: aitowaas@mail.ru

#### Иванов Антон Андреевич

М.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», ассистент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: anton.ivvv@gmail.com

УДК 621.372.22

П.В. Микола, З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев

## Анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков на основе диаграммы координата–время

Выполнен анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков для режимов холостого хода и короткого замыкания в конце линии. Выполнено сравнение диаграммы координата–время и временных откликов на импульсное воздействие. Получено полное совпадение амплитуд импульсов в узлах линии.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, микрополосковая линия передачи, временной отклик, диаграмма координата–время.

Важным этапом в проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) является обеспечение требований по их электромагнитной совместимости (ЭМС). Так, важно обеспечение помехозащищенности РЭС критически важных объектов страны [1]. В связи с плотной компоновкой печатных плат, уменьшением рабочих напряжений внутренних элементов и ростом диапазона частот используемых сигналов РЭС становится все более уязвимым к электромагнитным воздействиям [2, 3].

При эксплуатации критичных РЭС (например, объектов связи) опасность представляет возможность преднамеренного использования генераторов мощных сверхкоротких импульсов (СКИ) с целью дестабилизации работы объекта [4]. Традиционные устройства не всегда способны обеспечить защиту от СКИ из-за ряда недостатков (пробой при высоких напряжениях, паразитные параметры, недостаточное быстродействие) [5]. Специфика воздействия СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов, нарушая целостность цифрового сигнала, а при более высокой амплитуде проникать через традиционные средства защиты и приводить к выходу РЭС из строя [6] даже по цепям питания [7]. Поэтому актуален поиск новых подходов для обеспечения защиты РЭС от СКИ и совершенствование известных средств защиты.

Одним из принципов защиты от СКИ является его разложение на последовательность импульсов меньшей (относительно исходной) амплитуды в меандровых линиях специальной конфигурации [8]. Традиционно меандровые линии применяются для задержки сигнала на печатной плате при его тактировании в точке приема. Поэтому существенная часть исследований направлена на анализ искажений сигнала в меандровых линиях задержки [9, 10].

В основе таких устройств лежит явление модального искажения сигнала (разложение помехового сигнала на моды за счет различия скоростей их распространения) [11]. Так, исследовано разложение СКИ в витке меандровой линии с нерегулярным поперечным сечением и представлены первые результаты такого анализа для витка, состоящего из двух

отрезков с разными параметрами поперечного сечения. В результате выявлены дополнительные импульсы на выходе линии, возникающие из-за рассогласования на стыке отрезков [12].

Поскольку результаты анализа получены с помощью численного моделирования, то для более полного понимания причин искажения сигнала целесообразно оценить его аналитически. Такие оценки легко получить на основе диаграмм координата–время [13]. Между тем виток меандра является достаточно сложной структурой, поэтому сначала нужно выполнить анализ диаграмм координата–время более простой модели, например, одиночной линии передачи из двух отрезков, но с учетом окончаний на стыке проводников, которые в меандре характеризуются холостым ходом (ХХ) для четной моды и коротким замыканием (КЗ) для нечетной. Цель данной работы – выполнить такой анализ.

### Исходные данные для моделирования

Для исследования выбрана одиночная линия из двух одинаковых отрезков со следующими параметрами поперечного сечения (рис. 1): ширина проводников первого и второго отрезков  $w = 1000$  мкм и  $w = 500$  мкм соответственно; толщина фольги  $t = 100$  мкм; толщина подложки  $h = 510$  мкм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 10$ ; расстояние от края структуры до проводников  $d = 3w$ .

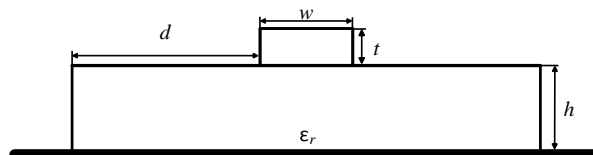


Рис. 1. Вид поперечного сечения отрезка исследуемой линии

Длина исследуемой линии  $l = 0,4$  м. Первый отрезок на ближнем конце соединен с источником импульсных сигналов ( $E_{ист}$ ) с внутренним сопротивлением  $R_1 = 50$  Ом, а второй – с приемным устройством с сопротивлением  $R_2$ . При моделировании сопротивление  $R_2 \rightarrow \infty$  для имитации ХХ и  $R_2 \rightarrow 0$  для имитации КЗ (1 МОм, 10 мкОм). В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В и длитель-

ностями фронта, плоской вершины и спада импульса по 50 пс.

### Выражения для вычисления амплитуды сигнала на стыках линии

Для построения диаграмм координата–время надо вычислить амплитуду напряжения сигнала на каждом стыке исследуемой линии: между источником и первым отрезком; между приемным устройством и вторым отрезком; между первым и вторым отрезками. Далее приведены используемые выражения, детально описанные в [14]. Амплитуды проходящей и отраженной волн определяются как

$$U_{\text{прох}} = U_{\text{пад}} T, \quad (1)$$

$$U_{\text{отр}} = U_{\text{пад}} \Gamma, \quad (2)$$

где  $U_{\text{пад}}$  – амплитуда падающей волны (в узле  $V_1$ ), которая определяется как

$$U_{\text{пад}} = E_{\text{ист}} \frac{Z_1}{Z_1 + R_1}, \quad (3)$$

где  $Z_1$  – волновое сопротивление первого отрезка,  $\Gamma$  и  $T$  – коэффициенты передачи и отражения соответственно. Для стыка между источником и первым отрезком эти коэффициенты определяются как

$$\Gamma_{\text{ист}} = \frac{R_1 - Z_1}{R_1 + Z_1}, \quad (4)$$

$$T_{\text{ист}} = 1 + \Gamma_{\text{ист}}, \quad (5)$$

стыка между вторым отрезком и нагрузкой –

$$\Gamma_{\text{нагр}} = \frac{R_2 - Z_2}{R_2 + Z_2}, \quad (6)$$

$$T_{\text{нагр}} = 1 + \Gamma_{\text{нагр}}, \quad (7)$$

стыка отрезков –

$$\Gamma_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \Gamma_{21} = -\Gamma_{12}, \quad (8)$$

$$T_{12} = 1 + \Gamma_{12}, \quad T_{21} = 1 + \Gamma_{21}, \quad (9)$$

где  $Z_2$  – волновое сопротивление второго отрезка.

Выражения (6), (7) после простых преобразований при  $R_2 \rightarrow \infty$  и  $R_2 \rightarrow 0$  примут вид

$$\Gamma_{\text{нагр}}^{\text{КЗ}} = -1, \quad (10)$$

$$\Gamma_{\text{нагр}}^{\text{XX}} = 1, \quad (11)$$

$$T_{\text{нагр}}^{\text{КЗ}} = 0, \quad (12)$$

$$T_{\text{нагр}}^{\text{XX}} = 2. \quad (13)$$

### Построение диаграмм координата–время

Для детального анализа распространения сигнала в одиночной линии из двух отрезков построены диаграммы координата–время по (1) и (2) для режимов КЗ и XX в конце линии (рис. 2). Для этого в системе TALGAT [15] вычислены волновые сопротивления ( $Z_1 = 36,54$  Ом и  $Z_2 = 53,12$  Ом) и погонные задержки ( $\tau_1 = 1,58$  нс/м,  $\tau_2 = 1,48$  нс/м) отрезков.

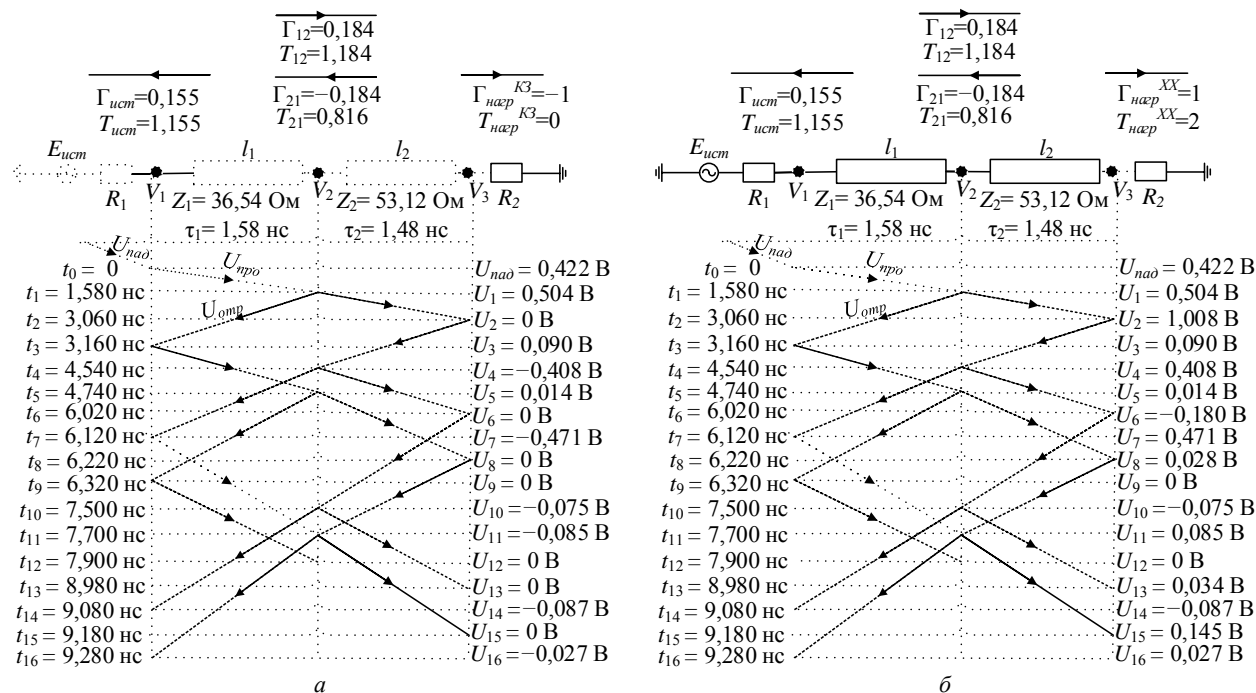


Рис. 2. Диаграммы координата-время для режимов КЗ (а) и XX (б) в конце второго отрезка

На рис. 2, а представлена диаграмма координата–время для режима КЗ в конце линии. Из диаграммы видно, что первое отражение проходящей волны возникает от стыка между первым и вторым отрезками с коэффициентом отражения  $\Gamma_{12} = 0,184$ .

Отраженный импульс приходит в начало линии с задержкой  $t_3$  и амплитудой  $0,09$  В. Следующее отражение возникает от стыка между вторым отрезком и приемным устройством (узел  $V_3$ ). Импульс падающей волны полностью отражается ( $\Gamma_{\text{нагр}} = -1$ ) от

стыка и приходит в узел  $V_2$  в момент времени  $t_4$  с обратным знаком в соответствии с выражением (10) и амплитудой 0,408 В. Последующие импульсы являются переотражениями от стыков (между отрезками и вторым отрезком и приемным устройством), этих импульсов. Следуя рассмотренному принципу, можно оценить амплитуду импульсного сигнала в любом узле линии с учетом всех отражений вплоть до полного его затухания.

На рис. 2, б представлена диаграмма координата–время для режима ХХ в конце линии. Видно, что первое отражение проходящей волны возникает

от стыка между отрезками с коэффициентом отражения  $\Gamma_{12} = 0,184$ , а отраженный импульс приходит в узел  $V_1$  в момент времени  $t_3$  с амплитудой сигнала 0,09 В (как и для режима КЗ). При этом проходящий импульс приходит к концу линии (узел  $V_3$ ) с задержкой  $t_2$ , а его амплитуда составила 1,008 В за счет коэффициента передачи  $T_{\text{нагр}} = 2$  согласно (13). Второй отраженный импульс приходит в узел  $V_2$  с задержкой  $t_4$  и амплитудой 0,408 В за счет коэффициента отражения от стыка между вторым отрезком и нагрузкой ( $\Gamma_{\text{нагр}} = 1$ ).

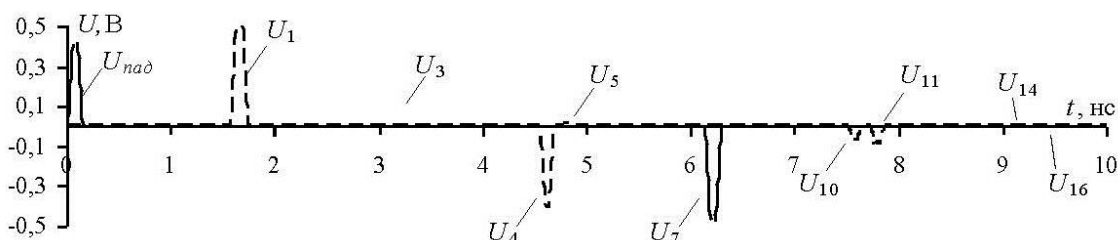


Рис. 3. Форма напряжения в узлах  $V_1$  (—) и  $V_2$  (- -) линии из рис. 2, а

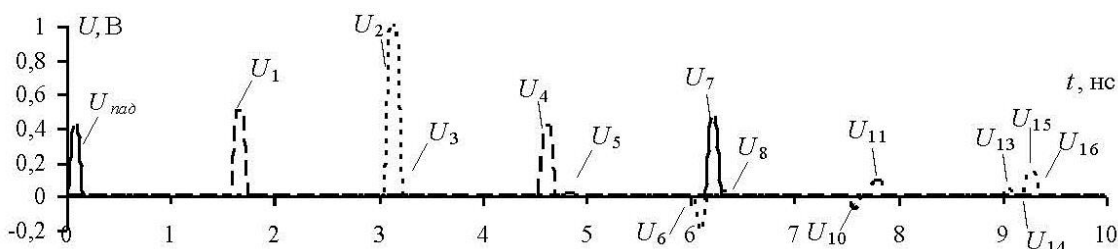


Рис. 4. Форма напряжения в узлах  $V_1$  (—),  $V_2$  (- -) и  $V_3$  (- - -) линии из рис. 2, б

Для оценки корректности полученных результатов в системе TALGAT вычислены формы напряжения в начале и конце линии для режима КЗ (см. рис. 3). На рисунке видно 10 импульсов. Первый импульс является импульсом падающей волны и имеет амплитуду  $U_{\text{пад}}$ , а второй – импульсом проходящей волны, пришедшим в узел  $V_2$  и имеющим амплитуду  $U_1$ . Последующие импульсы являются результатом отражений от стыков. Отметим, что амплитуды всех наблюдаемых импульсов на рис. 3 совпали с амплитудами, вычисленными по выражениям (1) и (2). Кроме того, из-за режима КЗ в моменты времени  $t_2$ ,  $t_6$ ,  $t_8$ ,  $t_{13}$  и  $t_{15}$  амплитуда сигнала в конце линии (узел  $V_3$ ) равна 0.

Вычислена форма сигнала во всех узлах линии для режима ХХ (рис. 2, б). Получено 16 импульсов в узлах линии. Первые три импульса являются основными. Так, первый импульс с амплитудой  $U_{\text{пад}}$  является падающим, второй с амплитудой  $U_1$  – отраженным от стыка между отрезками и проходящим во второй отрезок, а третий с амплитудой  $U_2$  – отраженным от стыка между вторым отрезком и приемным устройством и пришедшим к концу линии. Остальные импульсы возникают в результате отражений от стыков и приходят после трех основных импульсов. Также отметим, что амплитуды всех наблюдаемых импульсов на рис. 4 совпали с амплитудами, вычисленными по выражениям (1) и (2).

### Заключение

В работе представлены результаты предварительного анализа распространения импульсного сигнала в одиночной линии, состоящей из двух отрезков, для двух режимов согласования в конце линии: холостого хода и короткого замыкания. Выбор режимов обусловлен последующим переходом от структуры одиночной линии передачи из двух отрезков к более сложной структуре витка меандровой линии из двух отрезков, где распространяются две моды. Анализ выполнен на основе сравнения диаграмм координата–время одиночной линии и временного отклика на импульсное воздействие для каждого из режимов. В результате амплитуды импульсов в узлах линии, полученных двумя способами, совпадают. Далее целесообразно выполнить аналогичный детальный анализ витка меандровой линии.

Разработка алгоритмов и программ выполнена при поддержке гранта РФФ 21-79-0016. Моделирование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект FEWM – 2020-0041).

### Литература

1. Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров // Военный инженер. – 2016. – № 2 (2). – С. 10–17.



2. Мещеряков С.А. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при воздействии мощного СВЧ-импульса // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 12. – С. 1–15.
3. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–3.
4. Гизатуллин З.М. Исследование электромагнитной совместимости локальных вычислительных сетей при наносекундных электромагнитных воздействиях / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 5. – С. 463–466.
5. Response of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proceedings of the 15th International Zurich symposium on EMC. – 2003. – P. 127–132
6. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2 (65). – С. 22–34.
7. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.
8. Surovtsev R.S. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – P. 1864–1871.
9. Ramahi O.M. Full-wave analysis of delay lines / O.M. Ramahi, B. Archambeault // Proceedings of the International Zurich symposium on EMC. – 2001. – P. 537–539.
10. Bhohe A.U. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM / A.U. Bhohe, C. Lolloway, M. Picket-May // International Symposium on EMC. – 2001. – P. 805–810.
11. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – С. 40–44.
12. Микола П.В. Анализ временного отклика витка меандровой микрополосковой линии из двух отрезков с разными параметрами / П.В. Микола, Р.С. Суровцев // XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Электронные средства и системы управления (ЭССУ) – 2020». – 18–20 ноября 2020 г. Томск. – С. 304–306.
13. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – С. 142–146.
14. Hall S.H. Advanced signal integrity for high-speed digital designs / S.H. Hall, H.L. Hick. – Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2009. – 668 p.
15. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

---

**Микола Павел Владимирович**

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: mikolapavell@gmail.com

**Кенжегулова Зарина Муратбековна**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: zarina.kenzhegulova@mail.ru

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

Д.М. Мочалов, Д.В. Ключкин

## Алгоритмы визуализации результатов моделирования линий передачи методом конечных элементов

Усовершенствованы алгоритмы визуализации распределения потенциалов и напряженности электрического поля в поперечном сечении линии передачи программы FEM2D. Проведенное тестирование алгоритмов показало, что полученные результаты согласуются с результатами из других программ электростатического анализа, основанных на методе конечных элементов.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, алгоритм визуализации, линия передачи, напряженность электрического поля, распределение потенциалов, FEM2D.

При проектировании печатных плат и кабелей одной из важных задач является контроль характеристик линий передачи (ЛП). Так, точное вычисление матриц погонных параметров ЛП позволяет разработчикам выполнить их оптимальное проектирование. Использование систем автоматического проектирования (САПР) обладает преимуществами над физическим моделированием за счет ускорения и дешевизны. Поэтому при проектировании ЛП часто используются САПР.

Ранее разработана программа для электростатического анализа ЛП методом конечных элементов FEM2D [1]. Программа позволяет вычислять матрицы погонных параметров ЛП произвольной сложности в поперечном сечении.

Процесс моделирования в программе состоит из следующих этапов: создание модели, построение треугольной сетки (триангуляция Делоне), вычисление матриц погонных параметров, обработка и вывод результатов вычисления. Результаты расчета матриц погонных параметров выводятся в текстовом формате, а визуализация распределения потенциалов и напряженности электрического поля – в виде цветового отображения [2]. Однако визуализация не всегда выполняется корректно. Поэтому целесообразно провести модернизацию алгоритмов визуализации. Цель данной работы – выполнить эту модернизацию.

Ранее в программе реализованы алгоритмы визуализации распределения потенциалов и напряженности электрического поля [2], однако они имеют ряд недостатков. Так, визуализация напряженности электрического поля выполнялась не совсем корректно из-за отображения только по треугольной сетке (рис. 1). Кроме того, алгоритм визуализации распределения потенциалов некорректно отображал уровни низкого потенциала для близко расположенных проводников. Для унификации программного кода разработан обобщенный алгоритм визуализации.

### Разработка алгоритма

Дадим краткие пояснения по особенностям вычислений в программе. Сначала производится подготовка данных для работы алгоритма. Так, при выборе визуализации распределения потенциалов  $\varphi$  входными данными являются значения потенциалов в узлах сетки, доступные после этапа вычислений. При визуализации напряженности электрического поля

надо вычислить значения напряженности в узлах сетки. Для этого сначала вычисляются значения напряженности электрического поля  $E$  в каждом треугольнике сетки как

$$E = -\nabla\varphi. \quad (1)$$

Полученные значения  $E$  используются для вычисления напряженности электрического поля для каждого узла сетки как среднее арифметическое значение напряженности всех треугольников, содержащих данный узел. Далее выполняется визуализация.

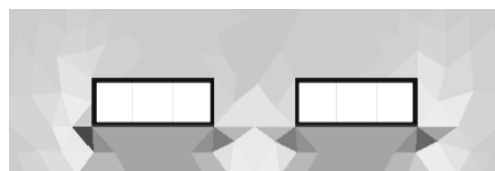


Рис. 1. Визуализация распределения потенциалов в предыдущей версии программы FEM2D

Первый этап алгоритма визуализации заключается в масштабировании выбранных значений (напряженности электрического поля или потенциалов) в узлах сетки. Масштабирование проводится для сопоставления значений в узлах сетки со значениями цветовой карты, в которой каждому цвету присвоен свой номер. В результате значения в вершинах каждого треугольника преобразуются в значение цветовой карты  $C$  как

$$C_i = N_C(V_i - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}), \quad (2)$$

где  $N_C$  – число цветов в карте (задается пользователем),  $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  – максимальное и минимальное значения искомой величины в структуре,  $i$  – индекс вершины треугольника. Результат масштабирования при  $N_C = 20$  показан на рис. 2 ( $I-III$  – ребра треугольника, а  $1-3$  – его вершины).

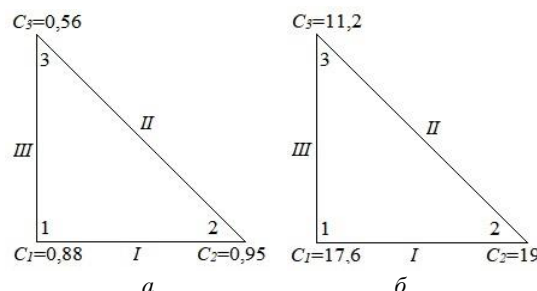


Рис. 2. Значения в узлах треугольника до (а) и после (б) масштабирования при  $N_C = 20$

После масштабирования при помощи интерполяции определяются места на ребрах треугольника, в которых происходит изменение цвета. Для этого попарно сравниваются значения в вершинах треугольника, определяется число целых значений между ними (число точек  $n$  на каждом ребре) и вычисляются их координаты. Так, для треугольника из рис. 2, б на ребре  $I$  будет всего одна точка ( $n = 1$ ,  $C = 18$ ), координаты которой  $(x, y)$  вычисляются по

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1)l, \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1)l, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  – координаты вершин 1 и 2, а  $l$  – величина, определяемая как

$$l = (C - C_1) / (C_2 - C_1). \quad (4)$$

Аналогичным образом определяются точки на двух оставшихся ребрах. Пример определения промежуточных точек на ребрах треугольника из рис. 2, б представлен на рис. 3.

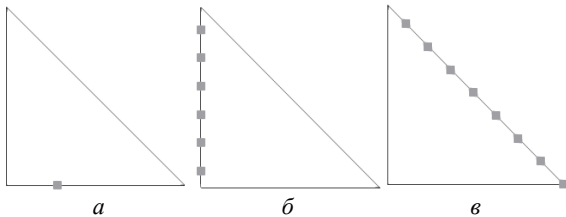


Рис. 3. Определение промежуточных точек на первом (а), втором (б) и третьем (в) ребрах треугольника из рис. 2, б

По всем полученным точкам производится построение вспомогательных треугольников. Вначале выбираются три точки с минимальными значениями, через которые производится построение вспомогательного треугольника. После чего точка с наименьшим значением далее игнорируется. Процесс повторяется до тех пор, пока общее число точек больше двух. Цвет вспомогательных треугольников выбирается согласно номеру из цветовой карты, который определяется как среднее арифметическое значение в вершинах вспомогательных треугольников. Пример процесса закрашивания треугольника представлен на рис. 4. Аналогичным образом рассматриваются остальные треугольники сетки.

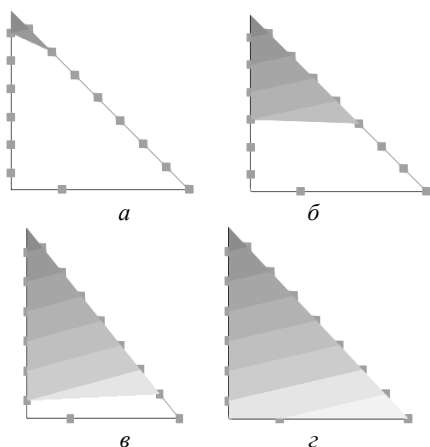


Рис. 4. Этапы 1–4 (а–д) раскрашивания треугольника из рис. 3

Блок-схема обобщенного алгоритма представлена на рис. 5.

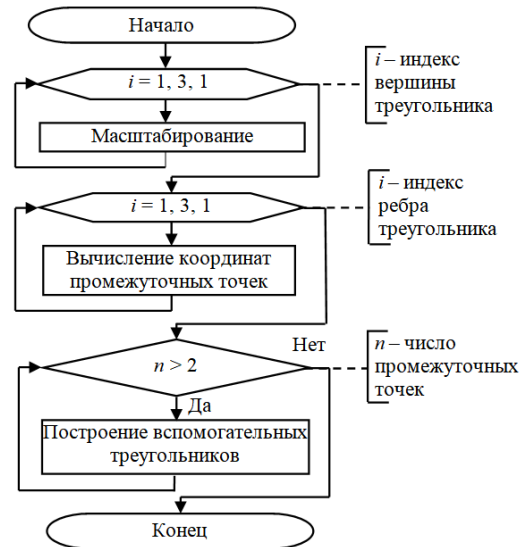


Рис. 5. Блок-схема обобщенного алгоритма визуализации распределения потенциалов и электрического поля в поперечном сечении ЛП

### Тестирование алгоритмов

Для верификации разработанных алгоритмов использована экранированная двухпроводная ЛП, поперечное сечение которой приведено на рис. 6. Параметры структуры: относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 2$ ,  $h_1$  – высота подложки 1 мм,  $h_2$  – высота до ограничивающего экрана 22 мм,  $w$  – ширина проводников 3 мм,  $s$  – расстояние между проводниками 2 мм,  $t$  – толщина проводников 1 мм,  $d$  – расстояние от края структуры до проводника 16 мм.

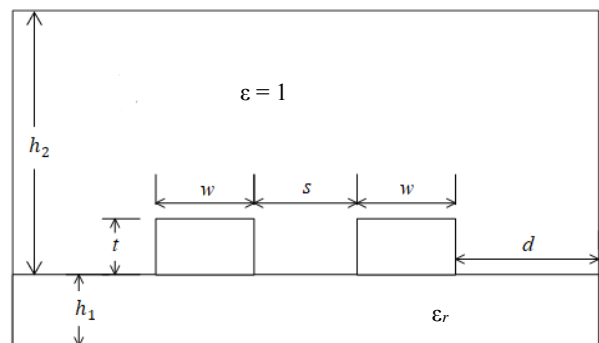


Рис. 6. Поперечное сечение экранированной двухпроводной ЛП

Результаты визуализации распределения потенциалов приведены на рис. 7, а напряженности электрического поля – на рис. 8. На рисунках также приведены результаты, полученные в FEMM [3] и ELCUT [4]. Видно, что результаты хорошо согласуются.

### Заключение

Выполнены усовершенствование алгоритмов визуализации программы FEM2D и их тестирование. Показана корректность разработанных алгоритмов и их программной реализации.

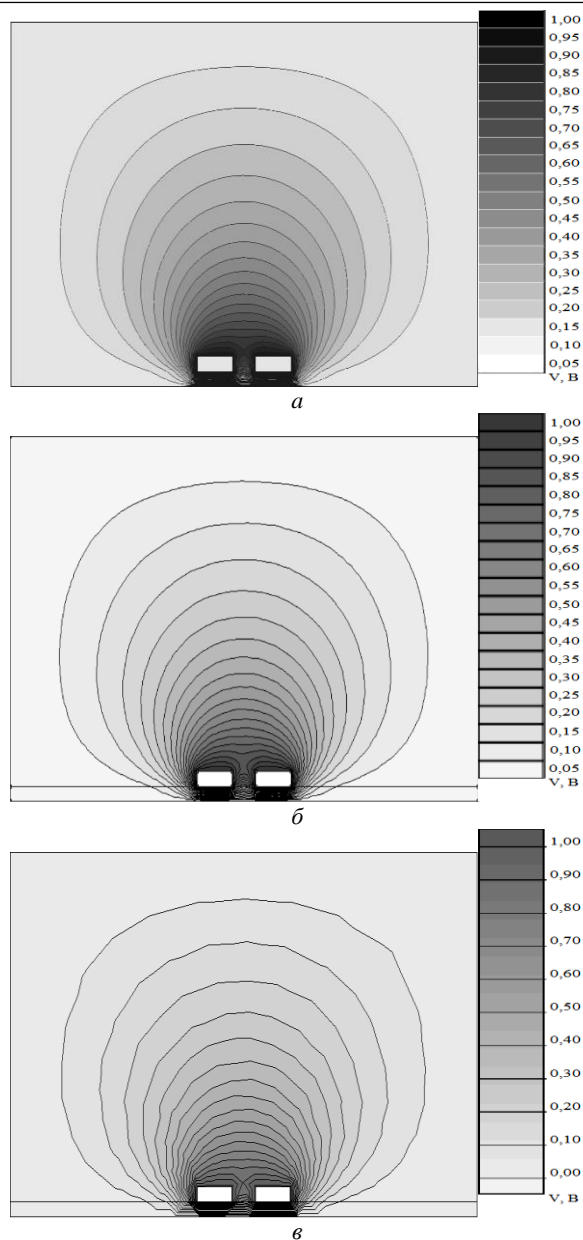


Рис. 7. Визуализация распределения потенциалов в FEM2D (а), FEMM (б) и Elcut (в)

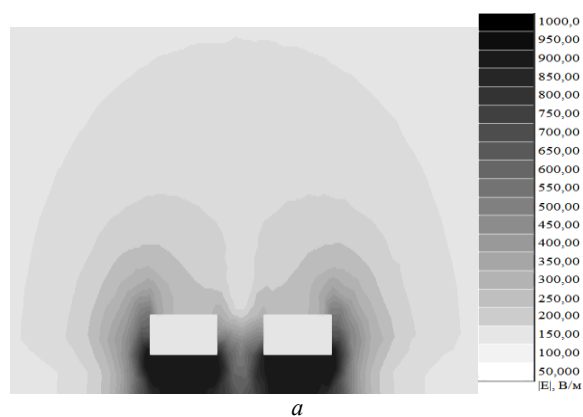


Рис. 8 (начало)

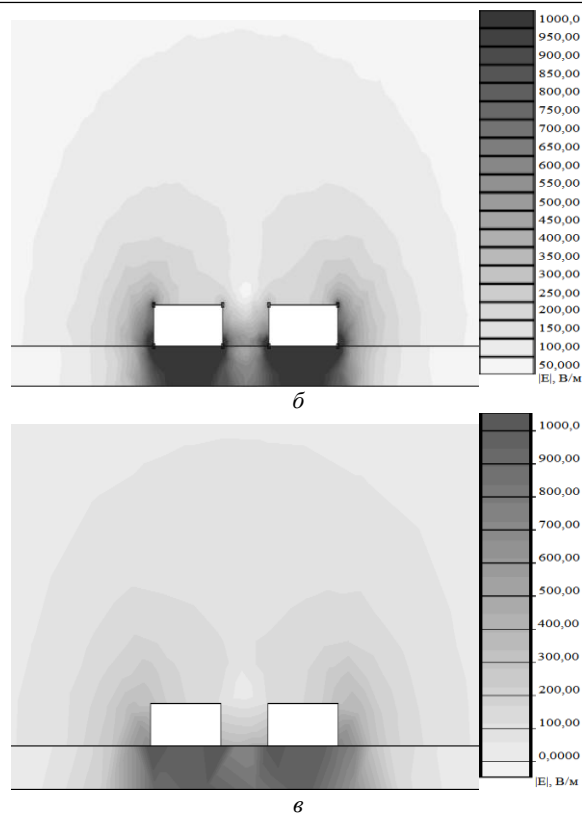


Рис. 8 (окончание). Визуализация напряженности электрического поля в FEM2D (а), FEMM (б) и Elcut (в)

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

#### Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660469 РФ. FEM2D 2021 / Д.В. Клюкин, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов. – Заявка № 2021619672. Дата поступления 23.06.21. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.06.21.
2. Клюкин Д.В. Новые функциональные возможности программного модуля электростатического анализа методом конечных элементов // Сб. избр. статей междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, Россия, 19–21 мая, 2021. – Ч. 2. – С. 64–67.
3. FEMM – Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.femm.info/> (дата обращения: 18.09.2021).
4. ELCUT – программа моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://elcut.ru/> (дата обращения: 18.09.2021).

**Мочалов Дмитрий Михайлович**  
Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРА  
Эл. почта: [dmochalov3@gmail.com](mailto:dmochalov3@gmail.com)

**Клюкин Дмитрий Владимирович**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУР  
Эл. почта: [yuhool1@mail.ru](mailto:yuhool1@mail.ru)

Т.И. Третьяков, П.А. Попов, М.Е. Комнатнов

## Экспериментальное исследование системы нагрева и охлаждения испытательного контейнера климатической экранированной камеры

Представлены результаты экспериментального исследования системы нагрева и охлаждения элемента испытательного контейнера климатической экранированной камеры. Выполнено исследование временной зависимости температуры элемента испытательного контейнера при его нагреве группой элементов Пельтье. Приведены вычисления количества теплоты и мощности в процессе нагрева и охлаждения элемента Пельтье.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, элемент Пельтье, ТЕМ-ячейка, радиатор, теплообмен, контур охлаждения.

Для проведения совместных испытаний на электромагнитную совместимость и климатические воздействия электронной компонентной базы радиоэлектронных средств разрабатывается климатическая экранированная камера (КЭК) [1]. Контроль и поддержание температуры внутри испытательного контейнера (ИК) КЭК в виде ТЕМ-ячейки обеспечиваются посредством системы терморегулятора. В основе системы терморегулятора лежит устройство управления [2, 3], работающее по принципу пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, а также система нагрева и охлаждения. Нагрев и охлаждение стенок ИК выполняется с помощью элементов Пельтье (ЭП), размещенных на поверхности стенок ТЕМ-ячейки. На данном этапе разработки КЭК требуется экспериментальное исследование работы системы терморегулятора с жидкостным охлаждением ЭП для получения зависимости температуры нагрева ИК от времени, расчета количества теплоты и мощности нагрева и охлаждения ЭП.

Цель работы – представить результаты экспериментального исследования системы терморегулятора КЭК с жидкостным охлаждением ЭП.

### Структурная схема системы нагрева и охлаждения ИК КЭК

Для обеспечения равномерного нагрева и охлаждения ИК используется группа из 24 ЭП, расположенных на каждой из сторон ТЕМ-ячейки (рис. 1).

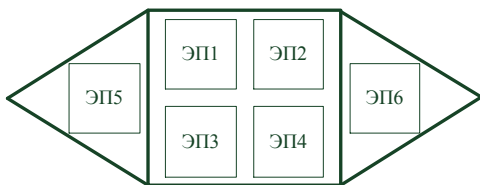


Рис. 1. Вид сбоку ТЕМ-ячейки с размещенными на ее поверхности ЭП

Для изменения температуры  $T$  в диапазоне значений от  $-50$  до  $+150$  °С в системе терморегулятора КЭК используются внешний и внутренний контуры охлаждения. Хладагент внешнего контура охлаждается при температуре ниже  $0$  °С, что позволяет обеспечивать отвод тепла от внутреннего контура, в котором в качестве охлаждающей жидкости выступает

95% раствор этилового спирта. Отвод тепла от ЭП осуществляется с помощью алюминиевых радиаторов размером  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>, размещенных на одной из сторон ЭП. Через радиаторы проходят медные трубки, соединенные с внутренним охлаждающим контуром (рис. 2).

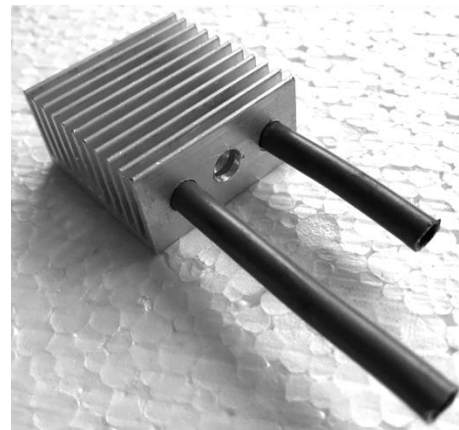


Рис. 2. Охлаждающий радиатор для ЭП

При охлаждении или нагреве ИК между ним и ЭП происходит процесс теплообмена, при котором большая часть отведенного тепла передается холодной стороне ЭП, из-за чего увеличивается температура горячей стороны. При циркуляции спиртового раствора во внутреннем контуре происходит отведение тепла от радиатора (Р1), охлаждающего горячую сторону ЭП. Тепло, отведенное внешним контуром от внутреннего контура, рассеивается в окружающей среде с помощью радиатора (Р2). При нагреве стенки ИК тепло, выделяемое горячей стороной ЭП, передается на ИК, а радиатор Р1 защищает ЭП от перегрева. Структурная схема системы нагрева и охлаждения ИК представлена на рис. 3.

### Измерение параметров работы системы терморегулятора КЭК

При проведении экспериментальной части исследования системы терморегулятора КЭК использован элемент испытательного контейнера КЭК в виде стола ТЕМ-ячейки из медной пластины размером  $98 \times 98$  мм<sup>2</sup> с толщиной 2 мм. На поверхность пластины в местах размещения ЭП, а также между охла-

жающими радиаторами и ЭП нанесен слой теплопроводящей пасты.

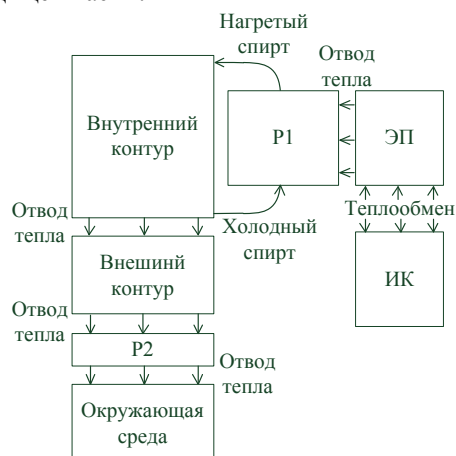


Рис. 3. Структурная схема системы нагрева и охлаждения стенок ИК КЭК

Медные трубки, размещенные в отверстиях радиаторов, соединялись с внутренним охлаждающим контуром из силиконовых трубок, подключенных к помпе для циркуляции спиртового раствора в контуре. Емкость со спиртовым раствором, в который погружалась помпа, размещалась внутри морозильной камеры, выступающей в роли внешнего охлаждающего контура с температурой  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Напряжение электропитания ЭП  $U = 12\text{ В}$ . Электропитание осуществлялось с помощью блока питания мощностью  $P = 1000\text{ Вт}$ . Отслеживание температуры происходило с помощью цифрового датчика температуры DS18B20, размещенного на поверхности стола ТЕМ-ячейки. Макет испытательной установки системы терморегулятора КЭК представлен на рис. 4.

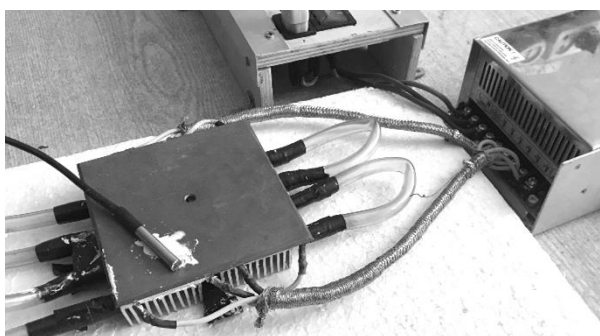


Рис. 4. Макет испытательной установки системы терморегулятора КЭК

Температура охлаждающей жидкости внутреннего контура, в момент времени  $t = 0\text{ с}$  составляла  $T_{\text{спирта}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура медной пластины  $T_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Циркуляция жидкости во внутреннем контуре осуществлялась с помощью водяной помпы со скоростью  $4\text{ л/м}$ .

Во время работы системы охлаждения установлено, что температура медной пластины с начального значения  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличилась до  $T(t_{\text{охл1}}) = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $t_{\text{охл1}} = 40\text{ с}$ . Дальнейшее снижение температуры с течением времени не наблюдалось.

Во время работы системы нагрева-установлено, что до момента времени  $t_{\text{нагр1}} = 138\text{ с}$  наблюдается линейный рост температуры с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{нагр1}}) = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в момент времени  $t_{\text{нагр2}} = 180\text{ с}$  температура медной пластины достигла значения  $T(t_{\text{нагр2}}) = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако с момента времени  $t_{\text{нагр2}}$  до  $t_{\text{нагр3}} = 269\text{ с}$  наблюдается линейное снижение температуры до значения  $T(t_{\text{нагр3}}) = +100\text{ }^{\circ}\text{C}$  без дальнейшего изменения (рис. 5).

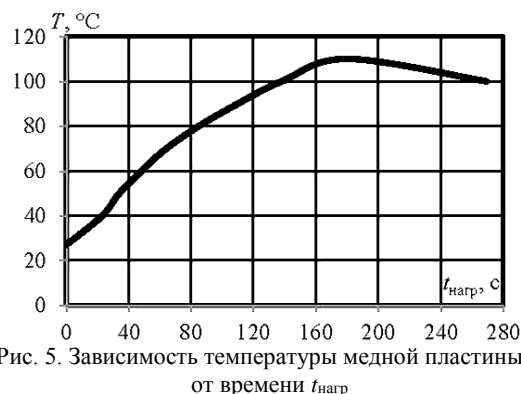


Рис. 5. Зависимость температуры медной пластины  $T$  от времени  $t_{\text{нагр}}$

#### Расчет количества теплоты и мощности нагрева и охлаждения ЭП

Выполнен расчет количества теплоты, отведенной от медной пластины:

$$Q = c \times m \times (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где  $c = 380\text{ Дж/кг}\times^{\circ}\text{C}$  – удельная теплоемкость меди,  $m = 0,189\text{ кг}$  – масса медной пластины;  $(T_1 - T_2)$  – разность температур на поверхности пластины [4].

Согласно выражению (1), количество теплоты, отведенной от медной пластины при ее охлаждении с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{охл1}}) = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , составило  $Q_{\text{охл}} = 864\text{ Дж}$ . При нагреве медной пластины с  $T(t_0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T(t_{\text{нагр1}}) = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , количество подведенной теплоты составило  $Q_{\text{нагр}} = 5256\text{ Дж}$ .

Выполнен расчет мощности, необходимой для нагрева или охлаждения медной пластины:

$$P = \frac{Q}{t}, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество теплоты,  $t$  – время нагрева или охлаждения [4]. При отведении от медной пластины количества теплоты  $Q_{\text{охл}} = 864\text{ Дж}$  за время  $t_{\text{охл}} = t_{\text{охл1}} - t_0 = 40\text{ с}$  мощность охлаждения ЭП  $P_1 = 21,6\text{ Вт}$ . При передаче медной пластине количества теплоты  $Q_{\text{нагр}} = 5256\text{ Дж}$  за время  $t_{\text{нагр}} = t_{\text{нагр1}} - t_0 = 138\text{ с}$  мощность нагрева ЭП  $P_2 = 38,1\text{ Вт}$ . Данные расчеты отражают мощность нагрева и охлаждения системы без учета потерь, вызванных процессами теплообмена медной пластины с окружающей средой.

На рис. 6 представлен график зависимости мощности нагрева или охлаждения ЭП от разности температур между двумя сторонами ЭП, при токе питания  $I = 7\text{ А}$ . Видно, что мощности охлаждения  $P_1 = 21,6\text{ Вт}$  соответствует разность температур в  $41,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а мощности нагрева  $P_2 = 38,1\text{ Вт}$  соответствует разность температур в  $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Согласно [5], максимально допустимая разность температур между противоположными сторонами

ЭП  $\Delta T = 70$  °С. Сопоставив данную информацию с полученными данными, можно сделать выводы, что данная конфигурация системы охлаждения ЭП нуждается в некоторых доработках для обеспечения достаточного охлаждения горячей стороны ЭП, необходимого для получения более низких температур (порядка  $T = -40$  °С) на поверхности медной пластины, выступающей в роли ИК.

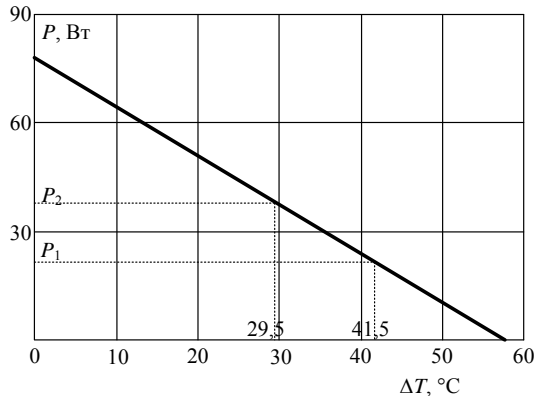


Рис. 6. Зависимость мощности нагрева (или охлаждения) ЭП  $P$  от разницы температур на противоположных сторонах ЭП [5]

Однако с функцией нагрева медной пластины, система нагрева и охлаждения в данной конфигурации, справилась полностью, нагрев пластину до  $T=100$  °С, учитывая то, что максимальная температура нагрева ЭП  $T = 100$  °С, согласно [5]. Для достижения  $T = 150$  °С система также нуждается в доработках, одной из которых может являться добавление вспомогательного нагревательного элемента, который будет дополнительно подводить тепло к ИК в момент работы системы в режиме нагрева и отключаться при переходе системы в режим охлаждения.

Основным недостатком системы охлаждения является малая площадь соприкосновения медных труб с охлаждающими радиаторами. Для решения данной проблемы планируется использование алюминиевых или медных блоков водяного охлаждения вместо охлаждающих радиаторов. Данные блоки имеют размер  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup> с толщиной 12 мм, что позволяет разместить их на поверхности ЭП, обеспечивая наиболее эффективный теплообмен за счет увеличения площади соприкосновения с ЭП.

Температура замерзания охлаждающей жидкости внутреннего контура, в роли которой выступает 95% раствор этилового спирта, согласно материалам, представленным в пособии [6],  $T = -114$  °С. Для улучшения показателей отвода тепла внутренним контуром от ЭП спиртовой раствор может быть охлажден до более низких температур. Для этого необходимо использовать более эффективный способ отвода тепла внешним контуром от внутреннего, а также следует увеличить время охлаждения спиртового раствора.

### Заключение

Таким образом, представлены результаты экспериментального исследования системы нагрева и охлаждения элемента ИК КЭК. Приведены вычисления количества теплоты и мощности в процессе нагрева и охлаждения ЭП, а также получено значение максимальной температуры охлаждения. Результаты измерений температуры элемента ИК при нагреве показали полное использование потенциала ЭП согласно его технической документации. Для достижения более низких температур в режиме охлаждения требуется замена радиаторов ЭП на блоки водяного охлаждения. Кроме того, следует увеличить время охлаждения спиртового раствора для большего снижения его температуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

### Литература

1. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – Т. 23, № 3. – С. 84–91.
2. Терморегулятор для климатической экранированной камеры / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2015. – Т. II. – С. 59–62.
3. Усовершенствование платы терморегулятором климатической экранированной камеры / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2016. – Т. I. – С. 225–226.
4. Эрдман С.В. Техническая термодинамика и теплотехника. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 87 с.
5. Specification of Thermoelectric Module TEC1-12712S // Thermoamic Electronics. – URL: <http://thermonamic.com/TEC1-12712S-English.pdf>
6. Шишкова Ю.В. Вопросы спиртометрии в фармацевтической технологии / Ю.В. Шишкова, В.А. Лиходед, А.В. Браженко, З.Р. Нова, Ф.Х. Кильдияров, В.В. Петрова. – Уфа: Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2014. – 73 с.

### Третьяков Тимур Игоревич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [henos19039@gmail.com](mailto:henos19039@gmail.com)

### Попов Павел Андреевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [tonot88@gmail.com](mailto:tonot88@gmail.com)

### Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-6463-2889  
Эл. почта: [maxmek@mail.ru](mailto:maxmek@mail.ru)

УДК 621.396.41

А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий

## Вычисление временных откликов экранированного модального фильтра из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах на воздействие типовых сверхкоротких импульсов

Представлены результаты квазистатического моделирования экранированного модального фильтра из двух каскадов (МФ), предназначенного для защиты радиоэлектронных средств в синфазном и дифференциальном режимах. Приведены временные отклики на выходе МФ при раздельном воздействии трех различных сверхкоротких импульсов.

**Ключевые слова:** модальный фильтр, сверхкороткий импульс, дифференциальный режим, синфазный режим, устройство защиты, радиоэлектронное средство.

В условиях современной электромагнитной обстановки радиоэлектронные средства (РЭС) все чаще подвергаются влиянию импульсных помех. На текущий момент известно большое количество помеховых воздействий с сверхшироким спектром, представленных сверхкороткими импульсами (СКИ) [1]. Компоненты спектра таких сигналов преодолевают традиционные средства защиты с небольшими потерями энергии импульса [2]. Уровни таких помеховых воздействий регламентируются стандартом ИЕС 61000-2-13 [3]. Различают два типа помех: дифференциальные и синфазные [4]. Уровень таких помех регулируется стандартом EN 55022 [5]. Для достижения требуемых стандартом уровней помехозащиты можно использовать устройства для борьбы с импульсными помехами, функционирующие за счет принципов модальной фильтрации [6]. К таким защитным устройствам относят модальные фильтры (МФ) и меандровые линии задержки [7, 8]. Среди МФ выделяют конфигурации, способные ослаблять помехи в обоих режимах воздействия, в частности – каскадные структуры, позволяющие дополнительно разделить каждый импульс на два импульса с меньшими амплитудами при условии удвоения длины последующих каскадов [9]. Также для улучшения защитных свойств активно применяют экранирующие корпуса [10]. Совокупное применение рассмотренных технических решений позволяет получить высокоэффективное устройство помехозащиты.

Цель работы – исследовать влияние формы СКИ на защитные свойства экранированного МФ из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах.

### Параметры МФ и подходы к моделированию

Поперечное сечение экранированного МФ представлено на рис. 1. Параметры поперечного сечения:  $w$  – ширина пассивных и активных проводников;  $w_1$  – ширина опорных проводников;  $s$  – расстояние между торцами проводников;  $h_1$  – расстояние от проводников до экрана;  $h_2$  – толщина подложки;  $h_3$  – расстояние между подложками;  $t$  – толщина проводников;  $g$  – расстояние между проводниками и экраном;  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости. В работе приняты следующие значения геометрических параметров (мм):  $w = 3$ ,  $w_1 = 6$ ,  $s = 0,5$ ,

$h_1 = 6$ ,  $h_2 = 4,3$ ,  $h_3 = 3$ ,  $t = 0,035$ ,  $g = 4,2$ . Также принято  $\epsilon_{r1} = 1$  и  $\epsilon_{r2} = 4,7$ .

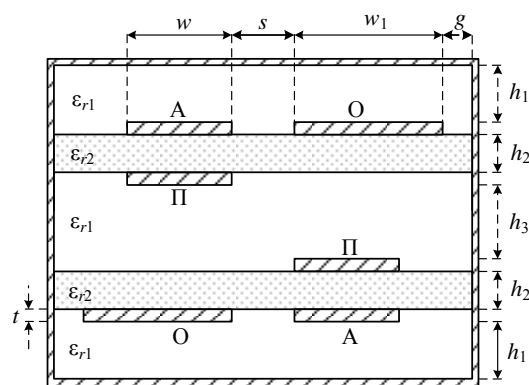


Рис. 1. Поперечное сечение экранированного МФ

В качестве тестовых воздействий использованы: оцифрованный сигнал с комбинированного вычислительного осциллографа С9-11 длительностью 300 пс и импульсные сигналы из стандарта МЭК 61000-2-13, соответствующие полупериоду и периоду синусоиды с длительностью 0,5 и 1 нс соответственно (далее – воздействия 1, 2 и 3). Формы ЭДС этих воздействий приведены на рис. 2.

На рис. 3 изображена схема электрических соединений МФ. Пассивные проводники соединены с электрическим экраном только на дальнем конце каждого каскада. МФ1 – первый каскад, а МФ2 – второй. Принято, что длина МФ1 110 мм, а МФ2 – 220 мм.

Для моделирования дифференциального режима между входными клеммами подключался генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом, а между выходными клеммами – нагрузочное сопротивление 50 Ом. Для моделирования синфазного режима входные клеммы соединялись между собой перемычкой, к которой подключался генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом. Выходные клеммы также соединялись перемычкой и подключались к нагрузочному сопротивлению 50 Ом.

### Результаты моделирования

Компьютерное моделирование выполнено без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Вычислены матрицы коэффициентов электромагнитной (L)



и электростатической (С) индукций в системе TALGAT [11].

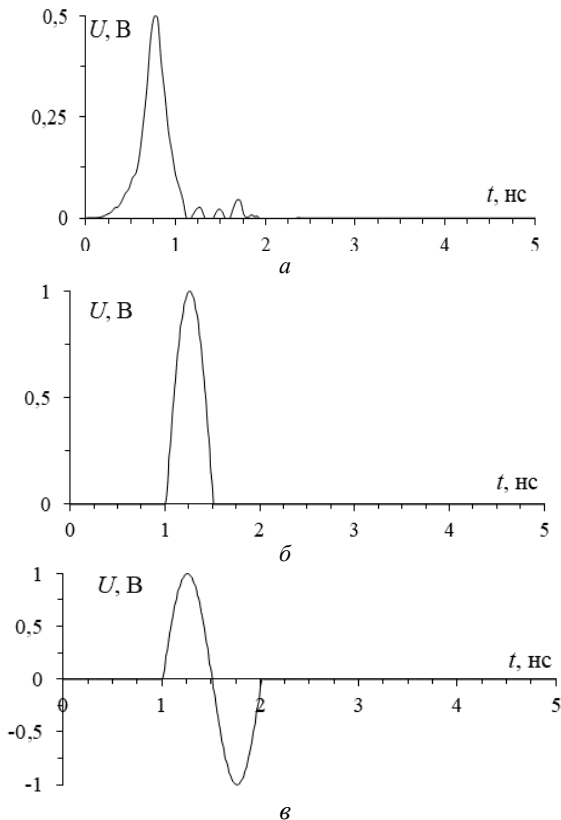


Рис. 2. Формы напряжений ЭДС импульсных воздействий: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

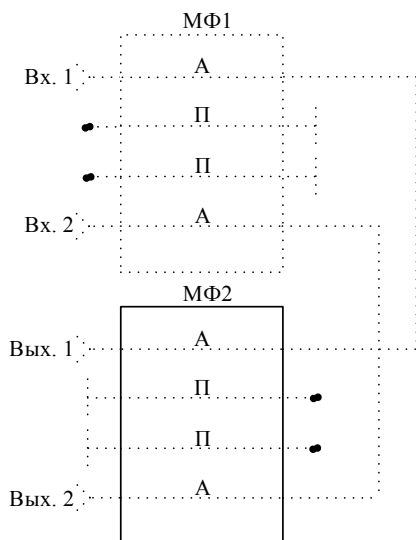


Рис. 3. Схема соединения МФ1 и МФ2: А и А' – активные проводники, П и П' – пассивные проводники

Вычисленные матрицы С и L имеют вид

$$C = \begin{bmatrix} 336,3 & -305,9 & -0,23 & -0,0176 \\ -305,9 & 337,6 & -2,2 & -0,23 \\ -0,23 & -2,2 & 337,6 & -305,9 \\ -0,0176 & -0,23 & -305,9 & 336,3 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 315,8 & 243,7 & 21,9 & 17,6 \\ 243,7 & 315,1 & 27,3 & 21,9 \\ 21,9 & 27,3 & 315,1 & 243,7 \\ 17,6 & 21,9 & 243,7 & 315,8 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м.}$$

На рис. 4 приведены полученные формы напряжения на выходе МФ при воздействии 1.

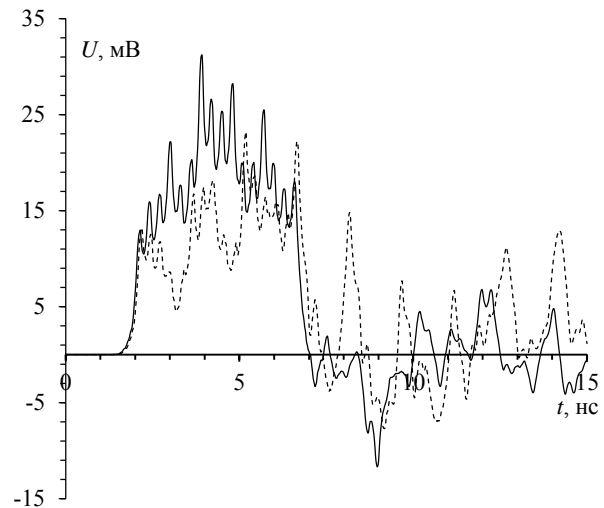


Рис. 4. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 1

Максимальные напряжения импульсов на выходе МФ составили 31 и 23 мВ для дифференциального и синфазного режимов. Вычислены вносимые потери по выражению

$$\alpha = 20 \lg(U_1/U_2), \text{ дБ,} \quad (1)$$

где  $U_1, U_2$  – напряжения с и без МФ [12], которые составили 18,1 и 20,7 дБ соответственно.

На рис. 5 приведены формы напряжения на выходе МФ при воздействии 2. Максимальные напряжения импульсов составили 57 и 45 мВ, а вносимые потери составили 18,9 и 20,9 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно.

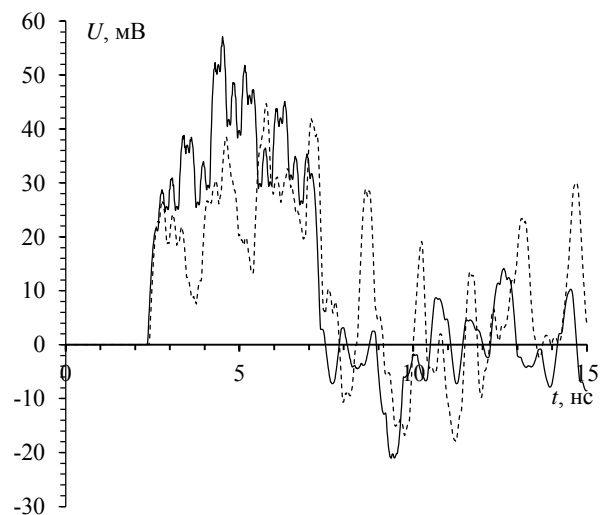


Рис. 5. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 2

На рис. 6 приведены формы напряжения на выходе МФ при воздействии 3. Максимальные напряжения на выходе составили минус 38 и 44 мВ, а вносимые потери – 37,6 и 38,9 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно.

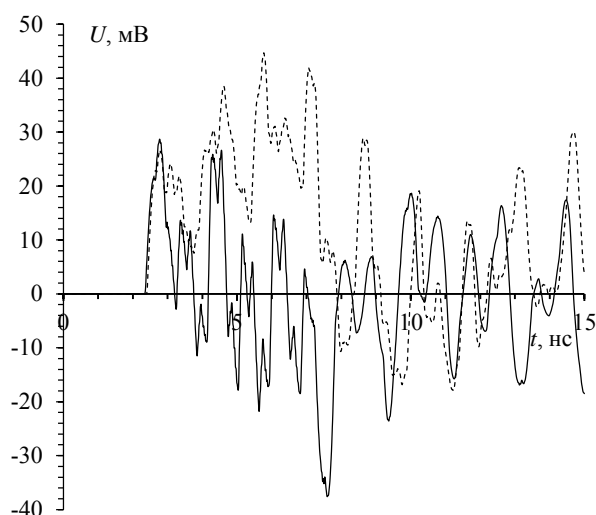


Рис. 6. Формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (---) режимах при воздействии 3

**Обсуждение результатов**

Результаты моделирования сведены в таблицу. Из таблицы видно, что МФ ослабляет все типы воздействий как в дифференциальном, так и синфазном режимах.

**Вносимые потери (дБ) в дифференциальном и синфазном режимах работы МФ**

Режим работы	Воздействие		
	1	2	3
Дифференциальный	18,1	18,9	37,6
Синфазный	20,7	20,9	38,9

**Заключение**

Вычислены временные отклики на выходе экранированного МФ из двух каскадов при воздействии трех видов СКИ в дифференциальном и синфазном режимах. Выявлено, что МФ способен ослаблять не только пикосекундные, но и наносекундные импульсы. Так, при воздействии оцифрованным сигналом с осциллографа С9-11 (длительность 300 пс) вносимые потери составили 18,1 и 20,7 дБ для дифференциального и синфазного режимов. При воздействии импульсными сигналами, соответствующими полупериоду и периоду синусоиды (длительность 0,5 и 1 нс), аналогичные значения составили 18,9; 20,9 дБ и 37,6; 38,9 дБ соответственно. Стоит отметить, что актуальность применения такого МФ обуславливается простотой его конструкции, что позволяет производить его в рамках типового технологического процесса печатных плат.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70020.

*Литература*

1. Opperman I. UWB Theory and applications / I. Opperman, M. Hamalainen, J. Linatti. – Finland, university of Oula, 2004. – 250 p.

2. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R Krzikalla, J.L. Haseborg. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 423–430.

3. МЭК 61000-2-13. Электромагнитная совместимость. – Ч. 2-13: Окружающая среда. Электромагнитные среды высокой мощности (НРЕМ). Излучаемые и проводимые. – 2005. – 44 с.

4. Балюк Н.В. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов / Н.В. Балюк, В.Г. Болдырев, В.П. Булеков. – М.: МАИ, 2004. – 648 с.

5. СТБ EN 55022. Электромагнитная совместимость. Радиопомехи от оборудования информационных технологий. Нормы и методы измерений. – 2012. – 70 с.

6. Заболоцкий А.М. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.

7. Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // Матер. VII регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – 2018. – С. 623–625.

8. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

9. Патент РФ на изобретение № 2748423. Авторы: Костелецкий В.П., Заболоцкий А.М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах. Заявка № 2020126543. Приоритет изобр. 10.08.2020. Опубл.: 25.05.2021. Бюл. № 15.

10. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – М.: Группа ИДТ, Изд. дом «Технологии», 2010. – 472 с.

11. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference series: materials science and engineering. – 2019. – Vol. 560, No. 012110. – P. 1–7.

12. Кечиев Л.Н. Помехоподавляющие фильтры. Методы проектирования / Л.Н. Кечиев, А.Л. Бобков, П.В. Степанов. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 1999. – 36 с.

**Лакоза Александр Михайлович**  
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-0778-5037  
Эл. почта: alexandrlakoza@mail.ru

**Костелецкий Валерий Павлович**  
Аспирант, ассистент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: kosteletskiy.vp@gmail.com

**Заболоцкий Александр Михайлович**  
Д-р техн. наук, доцент, проф. каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

А.Е. Максимов

## Неравномерная сегментация границ многопроводной линии передачи для расчета физической матрицы коэффициентов электростатической индукции

Предложен метод неравномерной сегментации микрополосковых многопроводных линий передачи с торцевой связью, который позволяет получить физические матрицы коэффициентов электростатической индукции при квазистатическом анализе методом моментов.

**Ключевые слова:** квазистатический анализ, метод моментов, матрица коэффициентов электростатической индукции, неравномерная сегментация границ.

Конкуренция между производителями радиоэлектронных средств (РЭС) вызывает необходимость регулярного обновления и совершенствования всех их видов. При этом с ростом сложности РЭС их разработка и совершенствование становятся невозможными без применения автоматизированного проектирования, в основе которого лежит компьютерное моделирование [1]. Для минимизации затрат на разработку РЭС необходимо уменьшение вычислительной сложности методов компьютерного моделирования при одновременном сохранении их точности.

Известно, что основными элементами РЭС являются линии передачи (ЛП) [2], для моделирования которых широко применяется квазистатический анализ, который основан на решении уравнения Пуассона–Лапласа с помощью численных методов конечных разностей, конечных элементов или моментов. При этом в методе моментов (МоМ) используется поверхностная сегментация границ анализируемой ЛП, что априорно снижает вычислительную сложность решения.

При использовании МоМ уравнение Пуассона–Лапласа записывается в интегральном виде

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\epsilon_0} \int \sigma(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\Gamma,$$

где  $\sigma(\mathbf{r}')$  – поверхностная плотность заряда,  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}'$  – точки наблюдения  $(x, y)$  и расположения источника  $(x', y')$  соответственно,  $d\Gamma$  – дифференциал по поверхности структуры,  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – функция Грина, а  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная. Граничные условия задаются по приложенному напряжению  $\phi$  и требуется найти плотность заряда  $\sigma$ . Это реализуется за счет сведения уравнения Пуассона–Лапласа с использованием базисных и тестовых функций к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с матрицей порядка  $N$ . Из матрицы-решения СЛАУ вычисляются матрицы погонных параметров ЛП  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{G}$  [3, 4]. При этом вычисление матрицы коэффициентов электростатической индукции  $\mathbf{C}$  является первичным [5]. Однако при анализе некоторых многопроводных линий передачи (МПЛП) матрица  $\mathbf{C}$  может оказаться нефизичной, что приводит к нефизичности временного отклика в конце ЛП [6, 7].

Наиболее простым методом борьбы с нефизичностью матрицы  $\mathbf{C}$  является уменьшение шага сег-

ментации ЛП. Поэтому целью работы является выявление оптимального метода сегментации границ МПЛП, дающего физические результаты.

### Неравномерная сегментация границ ЛП

Известно, что матрица  $\mathbf{C}$  должна быть симметричной, а сумма абсолютных значений внедиагональных элементов в каждой ее строке не должна превышать значения диагонального элемента [8]. Однако эти требования не всегда выполняются [6, 7], например, в микрополосковых МПЛП с числом проводников более 8, имеющих торцевую связь. Нефизичность матрицы  $\mathbf{C}$  в таких МПЛП также может проявляться в положительности её внедиагональных элементов, в увеличении взаимных коэффициентов при увеличении расстояния между проводниками, а также в завышенной асимметрии матрицы [5, 9, 10].

Для борьбы с нефизичностью может быть использована неравномерная сегментация. Так, в работе [11] предложен метод, применимый для анализа ЛП с одним проводником (одна правая часть в СЛАУ). В работе [12] метод был модифицирован на случай МПЛП (несколько правых частей). Поясним его суть с помощью упрощенного псевдокода:

1. Задать исходные параметры ЛП, а также требуемую точность вычислений  $tol$ , начальную сегментацию, максимальное число итераций для решения СЛАУ ( $N_{it}^{max}$ ) и определить контролируемую величину  $K$ .
2. Вычислить значение контролируемой величины  $K$ .
3. Для  $i$  от 1 до  $N_{it}^{max}$ .
4. Участить 25% от общего числа сегментов с максимальными значениями плотности заряда на них.
5. Вычислить значение контролируемой величины  $K$ .
6. Если  $tol < |K_i - K_{i-1}|/K_{i-1}$ .
7. Продолжать итерации.
8. Иначе
9. Выйти из цикла.

Этот метод позволяет добиться уменьшения вычислительных затрат [12], но не решает проблему нефизичности результатов для МПЛП с торцевой связью. Поэтому выполнена его модернизация таким образом, чтобы учащалось  $k$  % от общего числа сегментов для каждой правой части СЛАУ (далее – метод I). В результате разбиению подлежат не только сег-

менты, имеющие наибольший заряд в решении для первого проводника, а учитываются решения для всех проводников. Поскольку за одну итерацию не может быть разбито более 100% границ ЛП, то процент разбиваемых сегментов не должен превышать значения  $100/N$ . В предварительных вычислительных экспериментах установлено, что при  $k$  в диапазоне 65–85 результирующая матрица  $C$  физична. Поэтому далее принято  $k = 75$ .

**Вычислительный эксперимент**

Для апробации метода I рассмотрены три МПЛП с торцевой связью: 1 [13], 2 [14] и 3 [12] (рис. 1). Отметим, что в указанных работах анализировались 6-проводные ЛП и решения оказывались физическими. В данной работе исследованы 10-проводные ЛП. Особенностью МПЛП 2 в отличие от МПЛП 1 являются различные ширины проводников  $w$  и расстояния между ними  $s$ .

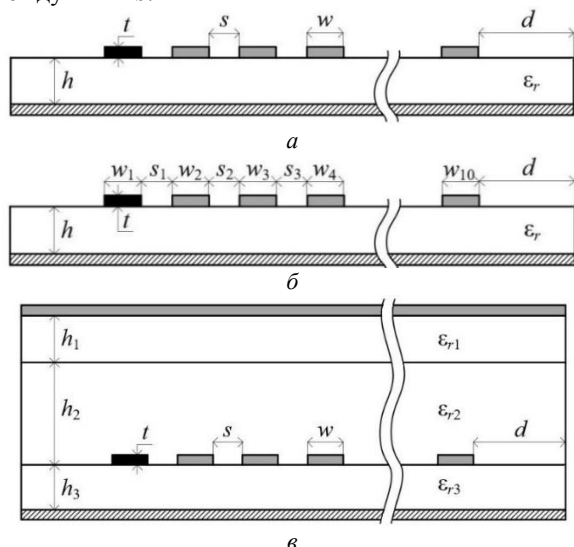


Рис. 1. Поперечные сечения МПЛП: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Геометрические параметры (мм) МПЛП I: толщина проводников  $t = 0,01$ ;  $w = 0,1$ ;  $s = 0,1$ ; расстояние от крайнего проводника до границы ЛП  $d = 0,2$ ; толщина подложки  $h = 1,8$ . Относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 6$ .

Параметры МПЛП 2:  $t = 0,02$ ;  $w_1 = w_9 = 0,2$ ;  $w_2 = w_8 = w_{10} = 0,3$ ;  $w_3 = w_7 = 0,4$ ;  $w_4 = w_6 = 0,5$ ;  $w_5 = 0,6$ ;  $s_1 = s_4 = s_6 = s_9 = 0,25$ ;  $s_2 = s_7 = 0,3$ ;  $s_3 = s_8 = 0,35$ ;  $s_5 = 0,2$ ;  $d = 2,48$ ;  $h = 1$ ;  $\epsilon_r = 4$ .

Параметры МПЛП 3:  $t = 0,005$ ;  $w = 0,05$ ;  $s = 0,05$ ;  $d = 0,15$ ;  $h_1 = h_3 = 0,05$ ;  $h_2 = 0,15$ ;  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 3,8$ ,  $\epsilon_{r2} = 2$ .

При вычислениях использован пакет GNU Octave. СЛАУ решались методом Гаусса. В качестве контролируемых величин использованы коэффициенты  $C_{11}$  контрольных проводников (см. черные проводники на рис. 1).

Полученные результаты (первые строки матриц  $C$ ) для МПЛП 1, 2 и 3 сведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. Для сравнения использована равномерная сегментация с длиной сегмента  $t/3$  [12] (далее – метод II). Как видно из таблиц, метод II показывает нефизичные результаты, а I – физические. Так, для всех МПЛП при использовании метода II не наблюдается последовательного уменьшения значений элементов строки. При этом для метода I значения элементов постепенно уменьшаются при удалении от диагонального элемента.

**Закключение**

Предложен метод неравномерной сегментации границ МПЛП с торцевой связью, дающий физические результаты. На примере трех микрополосковых МПЛП показана его эффективность. В дальнейшем целесообразна его апробация для многовариантного анализа и оптимизации МПЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

Таблица 1

**Значения элементов первой строки матрицы  $C$  для МПЛП 1, Ф/м**

Метод	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	$C_{17}$	$C_{18}$	$C_{19}$	$C_{110}$
I	5,77e-11	-3,42e-11	-8,86e-12	-4,63e-12	-3,05e-12	-2,33e-12	-2,01e-12	-1,57e-12	-1,30e-12	-1,23e-12
II	5,72e-11	-3,38e-11	-8,74e-12	-4,53e-12	-2,97e-12	-2,25e-12	-1,93e-12	-1,89e-12	-2,20e-12	-4,06e-12

Таблица 2

**Значения элементов первой строки матрицы  $C$  для МПЛП 2, Ф/м**

Метод	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	$C_{17}$	$C_{18}$	$C_{19}$	$C_{110}$
I	4,95e-11	-1,90e-11	-2,40e-12	-5,76e-13	-2,62e-13	-1,51e-13	-1,10e-13	-9,97e-14	-8,69e-14	-7,09e-14
II	4,96e-11	-1,90e-11	-2,40e-12	-5,76e-13	-2,62e-13	-1,51e-13	-1,09e-13	-8,58e-14	-6,59e-14	-1,13e-13

Таблица 3

**Значения элементов первой строки матрицы  $C$  для МПЛП 3, Ф/м**

Метод	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	$C_{17}$	$C_{18}$	$C_{19}$	$C_{110}$
I	9,85e-11	-9,95e-12	-1,39e-13	-5,11e-15	-3,22e-16	-8,37e-17	-5,00e-17	-3,45e-17	-2,49e-17	-2,44e-17
II	9,82e-11	-9,99e-12	-1,42e-13	-5,06e-15	-2,09e-16	-8,80e-18	-4,21e-19	-6,40e-20	-8,74e-20	-1,98e-18

*Литература*

- Saxena A. Computer aided engineering design / A. Saxena, B. Sahay. – Berlin: Springer, 2005. – 394 p.
- Gizatullin Z.M. Research of resonant effects in interconnects of multilayer PCB of computing equipment /

Z.M. Gizatullin, M.S. Shkinderov, A.O. Arkhipov // Proceedings of the 2020 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2020. – P. 116–119.

- Paul C.R. Analysis of multiconductor transmission lines / C.R. Paul, 2nd ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 800 p.

4. Djordjevic A.R. Analysis of finite conductivity cylindrical conductors excited by axially-independent TM electromagnetic field / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar, S.M. Rao // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1985. – Vol. MTT-33. – P. 960–966.
5. Evaluation of quasi-static matrix parameters for multiconductor transmission lines using Galerkin's method / M.B. Bazdar, A.R. Djordjevic, R.F. Harrington et al. // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 7. – P. 1223–1228.
6. Causal RLGC (f) models for transmission lines from measured S-parameters / J. Zhang, J.L. Drewniak, D. Pommerenke et al. // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2010. – Vol. 52, No. 1. – P. 189–198.
7. Peterson Z. Causal transmission line geometry optimization for impedance control in PCBs // 2020 IEEE 29th conference on electrical performance of electronic packaging and systems (EPEPS). – 2020. – 3 p.
8. Di Lorenzo E. The Maxwell capacitance matrix. – Fast-FieldSolvers S.R.L., 2020. – 2 p.
9. Pan G.W. Edge effect enforced boundary element analysis of multilayered transmission lines / G.W. Pan, G. Wang, B.K. Gilbert // IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications. – 1992. – Vol. 39, No. 11. – P. 955–963.
10. Linear time hierarchical capacitance extraction without multipole expansion / S. Balakrishnan, J. Park, H. Kim et al. // Computer design. – 2001. – P. 98–103.

11. Makarov S.N. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB / S.N. Makarov, G.M. Noetscher, A. Nazarian. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. – 616 p.
12. Maksimov A.E. Study of methods for constructing adaptive meshes for quasi-static analysis of multiwire transmission lines by the method of moments / A.E. Maksimov, S.P. Kuksenko // Journal of Radio Electronics. – 2021. – No. 1. – 25 p.
13. Khebir A. An absorbing boundary condition for quasi-TEM analysis of microwave transmission lines via the finite element method / A. Khebir, A.B. Kouki, R. Mittra // Journal of electromagnetic waves and applications. – 1990. – Vol. 4. – P. 145–157.
14. On the distortionless propagation in multiconductor transmission lines / L. Lombardi, G. Antonini, M. De Laetis [et al.] // IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology. – 2018. – Vol. 8. – P. 538–545.

---

**Максимов Александр Евгеньевич**

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа  
Эл. почта: mae@tusur.ru

К.Н. Абрамова, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов

## Разработка блока управления вентиляторами морозильной системы климатической экранированной камеры

Представлены результаты разработки блока управления вентиляторами морозильной системы климатической экранированной камеры. Приведены разработанные структурная схема и печатная плата блока управления. Выполнена сборка экспериментального макета блока управления и измерены параметры его работы в разных режимах.

**Ключевые слова:** блок управления вентиляторами морозильной системы, климатическая экранированная камера, электромагнитная совместимость, микроконтроллер.

Соблюдение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) при разработке различных радиоэлектронных средств (РЭС) позволяет на начальной стадии выявить решение важных задач проектирования [1]. При разработке РЭС выполняются моделирование и измерение в широком диапазоне параметров, например в диапазоне рабочих температур РЭС. Исследование отдельных компонентов и узлов РЭС на совместные климатические и электромагнитные воздействия [2] могут быть проведены при помощи специализированных устройств, одним из которых является разрабатываемая климатическая экранированная камера (КЭК) [3, 4]. Данное устройство предназначено для проведения совместных климатических и электромагнитных испытаний РЭС в широком диапазоне температур (от  $-50$  до  $+150$  °С). Для достижения отрицательных температур КЭК содержит морозильную систему, включающую радиаторный блок с вентиляторами.

Цель работы – разработать блок управления вентиляторами морозильной системы (БУВМС) для КЭК.

### Разработка схемы БУВМС

Разработана структурная схема БУВМС (рис. 1), содержащая микроконтроллер D1, два линейных стабилизатора напряжений (U1, U2), четыре узла регу-

лирования (УР1–УР4) и вентиляторов переменного тока (B1–B4). Каждый узел регулирования (УР) включает датчики температуры (Д1–Д4), управляющий ключ на полевом транзисторе (К1–К4), симисторную оптопару (V1–V4), симисторы (VS1–VS4) и датчики тока (ДТ1–ДТ4). При включении КЭК от её источника электропитания на БУВМС поступает два напряжения электропитания: постоянное 12 В и переменное 220 В.

Постоянное напряжение предназначено для электропитания стабилизированным напряжением (3,3 и 5 В) узлов регулирования (УР) и микроконтроллера (МК), а переменное – для электропитания вентиляторов.

Управление вентиляторами (B1–B4) осуществляется сигналом ШИМ от МК, через УР1–УР4. Сквозность сигнала ШИМ регулируется 32-битным МК (STM32F103C8T6) в зависимости от температуры радиаторного блока морозильной системы.

Данные о температуре поступают от четырех датчиков температуры, расположенных на радиаторном блоке. В зависимости от команд главного микропроцессора КЭК и измеряемых значений температуры МК производит расчёт скорости вращения каждого вентилятора.

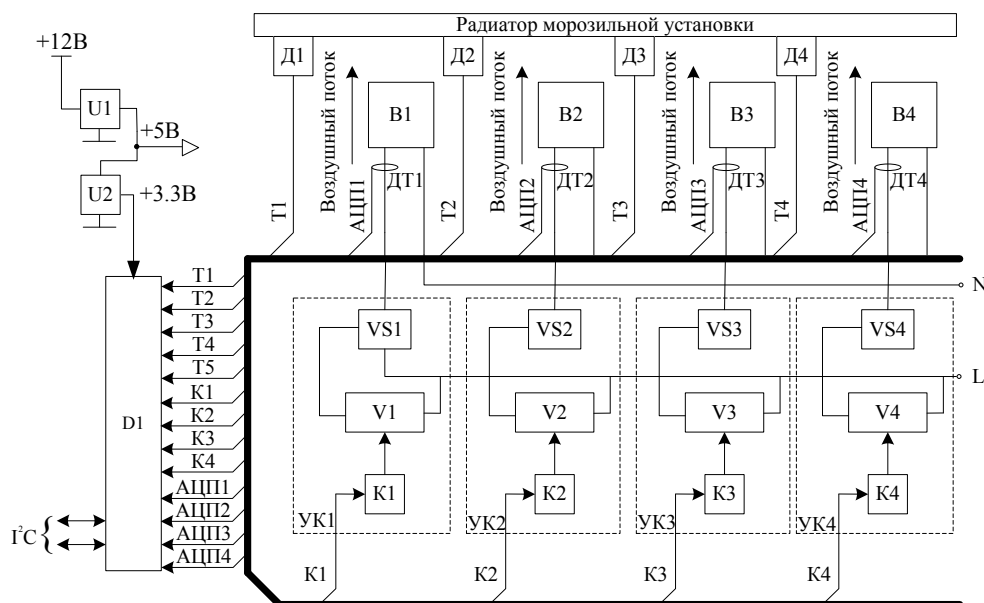


Рис. 1. Структурная схема БУВМС

В случае остановки или неисправности одного из вентиляторов программа в МК обнаруживает неисправный вентилятор на основе данных с датчиков тока и температуры, принудительно выключая неисправный вентилятор. При этом передаётся сообщение об ошибке на главный микропроцессор КЭК. БУВМС реализован на двухслойной печатной плате размером  $110 \times 75 \text{ мм}^2$  (рис. 2).

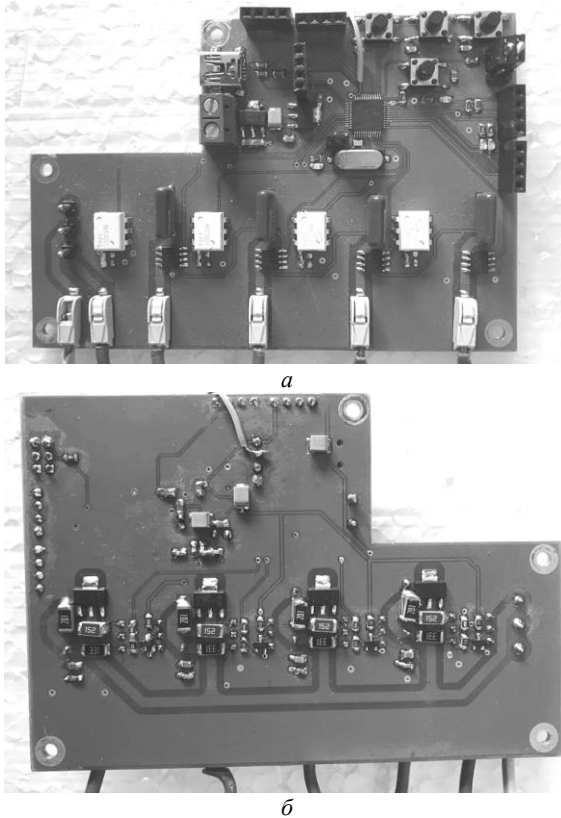


Рис. 2. Устройство БУВМС вид сверху (а), вид снизу (б)

#### Экспериментальное исследование БУВМС

Для проверки корректности работы БУВМС в МК запрограммировано 5 режимов скорости вращения, изменяемых посредством увеличения коэффициента заполнения ШИМ-сигнала (табл. 1). Переключение между режимами работы осуществляется с помощью дополнительных кнопок на плате БУВМС.

Таблица 1

#### Коэффициент заполнения ШИМ-сигнала для режимов работы вентиляторов

Режим скорости вращения вентиляторов	Коэффициент заполнения $D$ , %
1	20
2	45
3	70
4	85
5	100

Выполнена сборка экспериментального макета БУВМС (рис. 3) и выполнена проверка корректности его работы. В качестве источника питания БУВМС выбран блок питания мощностью  $P = 1 \text{ кВт}$ . Управление производилось четырьмя вентиляторами. Для

каждого режима работы БУВМС с помощью вольтметра выполнены измерения напряжения на входе вентилятора.

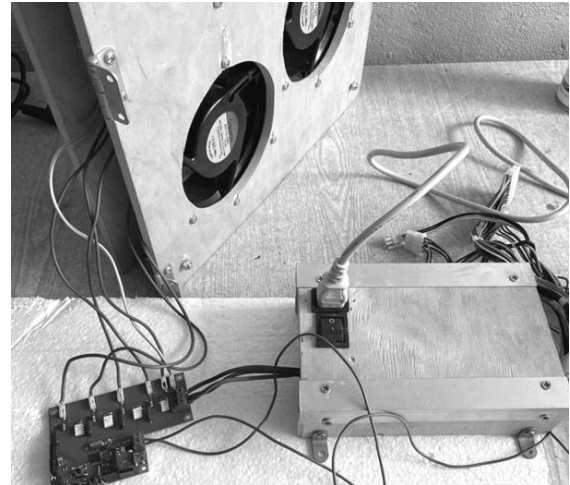


Рис. 3. Экспериментальный макет БУВМС

По измеренным значениям напряжения вычислен коэффициент заполнения ШИМ-сигнала для каждого режима согласно выражению

$$D = \frac{U_{\text{ср.н}}}{U_{\text{ип}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ср.н}}$  – среднее напряжение на выходе,  $U_{\text{ип}}$  – напряжение источника питания 220 В. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты эксперимента

Режим скорости вращения вентиляторов	$U_{\text{ср.н}}$ , В	$D$ , %
1	50	23
2	100	46
3	150	68
4	190	86
5	220	100

При сравнении заданных (см. табл. 1) и измеренных (см. табл. 2) значений коэффициента заполнения ШИМ-сигнала  $D$  для всех режимов работы максимальное расхождение составило 3%, что говорит о корректности работы БУВМС.

#### Заключение

В данной работе представлены результаты разработки БУВМС, предназначенного для регулирования воздушного потока вентиляторов морозильной системы КЭК. Выполнена проверка работоспособности устройства путем сравнения запрограммированных в МК значений коэффициента заполнения ШИМ-сигнала со значениями, полученными при работе БУВМС. Показано, что измеренные значения коэффициентов отличаются не более чем на 3% от заданных в МК значений, что говорит о корректности работы БУВМС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.

*Литература*

1. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с.
2. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4(34). – С. 39–45.
3. Пат. 2558706 РФ. Климатическая экранированная камера / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов. – № 2014103639. Заявл.: 3.02.2014; опубл.: 08.07.15.
4. Komnatnov M.E. Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // Proc. of IEEE International microwave workshop series on RF and wireless technologies for biomedical and healthcare applications (IMWS-Bio 2014). – 2014. – P. 64–68.

**Абрамова Ксения Николаевна**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: xeniaabramova99@mail.ru

**Осинцев Артем Викторович**  
Аспирант каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: kubenet@gmail.com

**Комнатнов Максим Евгеньевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-6463-2889  
Эл. почта: maxmek@mail.ru



М.А. Самойличенко

## Экранированный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате

Оценено влияние соединения опорных проводников с помощью экрана в модальном фильтре (МФ) на двухсторонней печатной плате. Рассмотрены две структуры МФ: с четырьмя опорными проводниками (по краям МФ на внешних слоях) и с удалением двух диагональных опорных проводников. Выполнено моделирование распространения сверхкороткого импульса в таких структурах. Показано, что соединение опорных проводников между собой с помощью экрана может фактически устранить их влияние, поскольку выполнять функцию опорных проводников может экран.

**Ключевые слова:** модальная фильтрация, сверхкороткий импульс, опорный проводник, экран.

Невыполнение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) может привести к сбою электроники в разных сферах, например, воздушного, железнодорожного транспорта, автоматических производственных линий, систем управления промышленных объектов и объектов энергетики, медицинского оборудования. За счет перехода к цифровым устройствам проблема ЭМС особенно обостряется: под воздействием помех электроника может срабатывать ложно и даже выходить из строя. ЭМС нарушается, если уровень помех слишком высок и помехоустойчивость оборудования недостаточна. В этом случае возможны нарушения в работе компьютеров, цифровых устройств релейной защиты, автоматизированных систем управления, что может привести к катастрофическим последствиям [1].

Особо опасными являются широкополосные помехи, которые обычно проявляются в виде отдельных импульсов или их последовательности. Частным случаем таких помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [2]. Сбои, возникающие при импульсных помехах в электронных устройствах, вызывают повреждение, рассеивание мощности и разрушение устройств [3]. Эффекты повреждения обычно возникают, когда импульсная помеха попадает в оборудование в результате индуктивного взаимодействия (в линиях питания или передачи данных). После этого электронные компоненты пытаются обработать импульсную помеху как действительную логическую команду. В результате происходит блокирование системы, возникают сбои, выдаются ошибочные данные на выходе, теряются или повреждаются файлы, а также возникают другие нежелательные эффекты. Материалы, используемые для изготовления электронных компонентов, могут выдержать определенное число повторяющихся энергетических всплесков, но недолго. Происходящий замедленный распад в конечном итоге приведет к выходу компонентов из строя. Эффекты разрушения обобщают все случаи, когда импульсные помехи с высокими уровнями энергии вызывают немедленный отказ оборудования. Часто это видимые физические повреждения, например, сгоревшие или треснувшие платы и компоненты персонального компьютера, оплавленные электронные компоненты и др. Поэтому защита от электромагнитных помех очень актуальна.

Хорошо подавляют СКИ новые защитные устройства, называемые модальными фильтрами (МФ) [4]. Это достигается за счет разложения на моды, каждая из которых распространяется со своей задержкой. Количество мод на выходе МФ определяется количеством проводников в линии. Технология модальной фильтрации исследуется в разных направлениях: МФ на печатных платах, меандровые линии, модальное резервирование, МФ в виде кабелей. Также исследуются МФ на двухсторонних печатных платах (ПП). Такие МФ имеют ряд достоинств, например: простота реализации, одинаково хорошее подавление СКИ вне зависимости от количества проводников в МФ [5], возможность разного соединения опорных проводников. Так, к примеру, ранее исследовался случай, когда опорные проводники соединялись только на концах МФ. Такой случай позволяет наблюдать, при некоторых параметрах в поперечном сечении (например, малом значении  $s$ ), на выходе МФ большее количество мод. Также в такой их реализации имеет значение количество опорных проводников [6]. Однако ранее не исследовался случай, когда все опорные проводники соединены между собой по всей длине МФ. Так, их можно соединить между собой, например, с помощью экрана или металлизированных отверстий.

Цель работы – оценить влияние соединения опорных проводников с помощью экрана в МФ на двухсторонней ПП.

Для моделирования структуры выбран МФ со всеми опорными проводниками и МФ без двух диагональных опорных проводников (удаление опорных проводников позволяет уменьшить массу МФ). Поперечные сечения МФ и схема включения приведены на рис. 1. Параметры поперечного сечения:  $s$  – расстояние между проводниками,  $w$  – ширина проводников,  $h$  – толщина диэлектрика,  $h_1$  – расстояние от проводника до экрана,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $t$  – толщина проводников. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит.

Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R_1$ . На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой  $R_3$ . Значения сопротивлений  $R_1=R_2=R_3=R_4=50$  Ом. На вход МФ подавался им-

пульс амплитудой ЭДС 2 В и общей длительностью 500 пс. Моделирование выполнено с помощью квазистатического подхода, реализованного в системе TALGAT [7]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

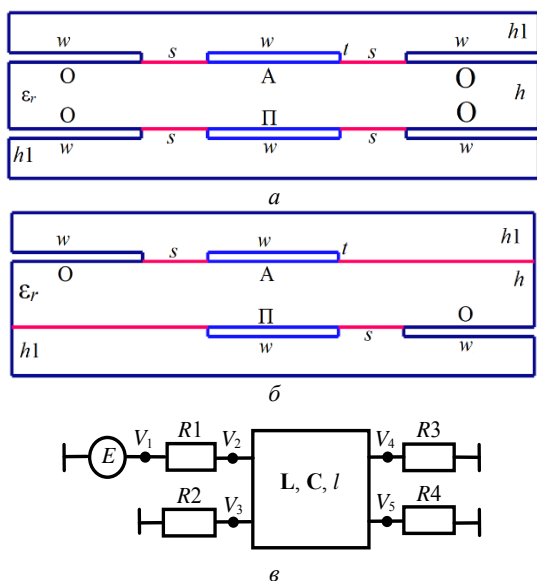


Рис. 1. Поперечные сечения МФ (проводники: О – опорный, П – пассивный, А – активный) со всеми опорными проводниками (а), без двух диагональных (б) и схема включения МФ (в)

**Результаты моделирования**

Моделирование выполнялось при одинаковых параметрах для двух МФ:  $t = 35$  мкм,  $w = 1500$  мкм,  $s = 500$  мкм,  $h = 500$  мкм,  $h1 = 500$  мкм,  $\epsilon_r = 4,5$ . Полученные значения амплитуд импульсов и погонные задержки приведены в табл. 1, а формы напряжения на входе и выходе МФ – на рис. 2.

Таблица 1  
**Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды импульсов ( $U_i$ , В) для двух МФ**

МФ	$\tau_1$	$\tau_2$	$U_1$	$U_2$
Со всеми опорными	4,085	5,932	0,493	0,399
Без двух диагональных	4,013	5,935	0,490	0,399

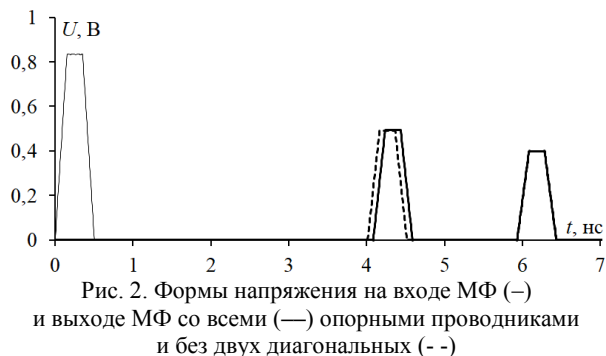


Рис. 2. Формы напряжения на входе МФ (—) и выходе МФ со всеми (—) опорными проводниками и без двух диагональных (- -)

Видно, что на выходе МФ два импульса. Амплитуда первой («быстрой») моды, которая распространяется преимущественно в воздухе, одинакова для двух МФ, однако время прихода отличается. Это обусловлено малым значением  $s$ , из-за чего образуется

разная торцевая связь с опорными проводниками (в МФ со всеми опорными проводниками она больше, а без диагональных – меньше). Опорные проводники заставляют первую моду больше распространяться в диэлектрике. Поэтому в МФ без двух диагональных проводников первая мода приходит быстрее. Вторая мода, которая распространяется преимущественно в диэлектрике, приходит в одно время и с одинаковой амплитудой.

**Влияние расстояния до опорных проводников**

Значение  $s$  изменялось в диапазоне 600–2000 мкм с шагом 100 мкм. В табл. 2 сведены полученные значения амплитуд импульсов и погонных задержек при изменении  $s$  для двух МФ. Видно, что изменение  $s$  влияет больше всего на время прихода первой моды.

Таблица 2

**Погонные задержки мод ( $\tau_i$ , нс/м) и амплитуды импульсов ( $U_i$ , В) для двух МФ при разных  $s$**

$s$ , мкм	Со всеми опорными				Без двух диагональных			
	$\tau_1$	$\tau_2$	$U_1$	$U_2$	$\tau_1$	$\tau_2$	$U_1$	$U_2$
600	4,019	5,934	0,491	0,399	3,961	5,936	0,489	0,399
700	3,966	5,936	0,489	0,399	3,919	5,937	0,488	0,399
800	3,923	5,936	0,488	0,399	3,885	5,937	0,487	0,399
900	3,889	5,937	0,487	0,399	3,858	5,937	0,486	0,399
1000	3,861	5,937	0,486	0,399	3,836	5,937	0,486	0,399
1100	3,838	5,937	0,485	0,399	3,819	5,937	0,484	0,399
1200	3,821	5,937	0,485	0,399	3,805	5,937	0,484	0,399
1300	3,806	5,937	0,484	0,399	3,794	5,937	0,484	0,399
1400	3,795	5,937	0,484	0,399	3,785	5,937	0,483	0,399
1500	3,786	5,937	0,484	0,399	3,779	5,937	0,484	0,399
1600	3,779	5,937	0,484	0,399	3,772	5,937	0,483	0,399
1700	3,773	5,937	0,484	0,399	3,768	5,937	0,483	0,399
1800	3,768	5,937	0,484	0,399	3,764	5,937	0,484	0,399
1900	3,765	5,937	0,484	0,399	3,761	5,937	0,484	0,399
2000	3,762	5,937	0,483	0,399	3,759	5,937	0,483	0,399

На рис. 3 приведена зависимость  $\tau_1$  от  $s$ . Из графика видно, что с увеличением  $s$  значения  $\tau_1$  становятся меньше и сближаются. Это объясняется тем, что при отдалении опорных проводников МФ становятся более симметричными относительно их центра. Как следствие, на выходе двух МФ можно наблюдать одинаковые отклики. Формы напряжения на входе и выходе двух МФ при  $s = 600$  и 2000 мкм показаны на рис. 4.

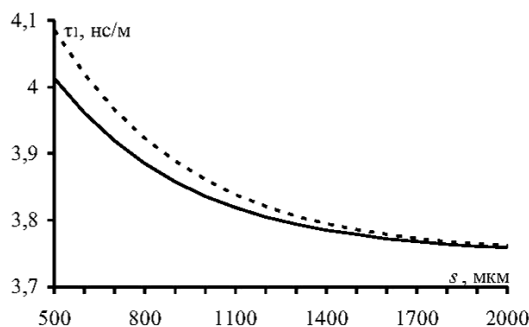


Рис. 3. Зависимости  $\tau_1$  от  $s$  для МФ со всеми опорными проводниками (—) и без диагональных (- -)

**Заключение**

В работе показано, что соединение опорных проводников с помощью экрана в МФ на двухсторонней

ПП позволяет достичь примерно одинакового разложения СКИ вне зависимости от количества опорных проводников. Их влияние уменьшается и фактически заменяется экраном. Это делает актуальным дальнейшие исследования влияния экрана на разложение СКИ в таких МФ.

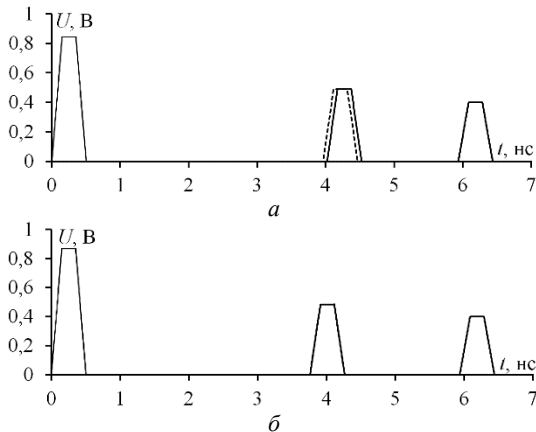


Рис. 4. Формы напряжения на входе МФ (—) и выходе МФ со всеми опорными проводниками (-) и без двух диагональных (- · -) при  $s = 600$  (а),  $2000$  мкм(б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90033.

#### Литература

1. Халилов Ф.Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы: учеб. пособие. – СПб.: Изд. НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2014. – 190 с.

2. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость электронных средств при воздействии наносекундных электромагнитных импульсов по сети питания / З.М. Гизатуллин, И.И. Набиев, М.Г. Нуриев // Техника и технология: Новые перспективы развития. – 2014. – № 12. – С. 107–110.

3. Защита линий передачи от импульсных помех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_File\\_Name=SADE5TNRN6\\_R0\\_RU.pdf&p\\_Doc\\_Ref=SPD\\_SADE5TNRN6\\_RU](https://download.schneiderelectric.com/files?p_File_Name=SADE5TNRN6_R0_RU.pdf&p_Doc_Ref=SPD_SADE5TNRN6_RU), свободный доступ (дата обращения: 05.09.2021).

4. Gazizov A.T. New printed structures for protection against UWB pulses / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, O.A. Gazizova // Proc. 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – Erlagol, Russia. – 2015. – P. 120–122.

5. Самойличенко М.А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 4. – С. 58–71.

6. Samoylichenko M.A. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board / M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, No. 012020.

7. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, S.P. Kuksenko // Complexity. – 2019. – 11 p.

#### Самойличенко Мария Александровна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-0889-5983  
Эл. почта: 1993mary2011@mail.ru

УДК 621.3

С. Карри, Р.С. Суворцев

## Анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в защитной меандровой линии

Представлены результаты квазистатического и электродинамического анализов влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса (СКИ) в витке микрополосковой линии с сильной торцевой связью, свернутом в 19 витков со слабой связью. Выявлено, что влияние потерь на форму импульсов незначительно, а их амплитуда уменьшается на 26,1% при квазистатическом и на 28,4% при электродинамическом анализе. Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на уменьшение амплитуды импульсов разложения СКИ (до 24% при квазистатическом и 26,9% при электродинамическом анализе). Совместное влияние потерь приводит к уменьшению амплитуды СКИ в 1,4 раза. Сделаны предположения о возможных причинах незначительных различий результатов (не более 2,5% по амплитуде) двух использованных подходов к моделированию.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, меандровая линия, сверхкороткий импульс, потери в линиях передачи, рассеяние мощности.

Стремительное развитие современных радиоэлектронных средств (РЭС) не только позволяет проектировать компактные и многофункциональные устройства, работающие на повышенных частотах, но также и приводит к ужесточению требований по обеспечению их электромагнитной совместимости (ЭМС). Несоблюдение требований ЭМС может привести к сбоям в работе и даже полному выходу РЭС из строя [1]. Одной из задач ЭМС является обеспечение защиты от электромагнитных воздействий, среди которых к наиболее опасным относится сверхкороткий импульс (СКИ). Такие импульсы за счет широкой полосы могут проникать внутрь РЭС, минуя его средства защиты, а за счет высокой амплитуды мгновенно выводить чувствительные цепи из строя. Для предотвращения отказа РЭС зачастую приходится прибегать к применению сложных многоуровневых и дорогостоящих систем защиты, которые зачастую часто не эффективны из-за малого быстродействия, недостаточной рассеиваемой мощности или ограниченного ресурса срабатывания их компонент [2]. Между тем поиск новых устройств и подходов для защиты РЭС от СКИ по-прежнему актуален. В связи с этим примечателен подход, основанный на явлении модального разложения сигнала на последовательность импульсов в полосковых структурах в форме меандровой линии (МЛ) [3].

Применение МЛ в качестве устройств защиты требует детального исследования влияния различных факторов на искажение формы сигнала на выходе линии. Наибольшее влияние на форму и амплитуду сигнала оказывают потери в линии. В общем случае в линии существуют три вида потерь: в проводниках, диэлектрике и на излучение. Влияние потерь в защитной МЛ исследовано ранее, но лишь на примере одного витка МЛ [4, 5]. Выявлено, что на форму и амплитуду импульсов разложения в конце МЛ наибольшее влияние оказывают потери в диэлектрике [4]. Между тем влияние потерь на искажение сигнала может существенно различаться в линиях с равной общей длиной, но разной конфигурацией проводника и

изготовленной на основе других материалов подложки. Примером является случай, когда необходимо уместить виток МЛ в заданной площади при неизменной общей длине линии. Тогда прибегают к сворачиванию исходного витка МЛ с сильной торцевой связью в меандр из  $N$  витков со слабой связью. Анализ влияния потерь на искажение формы сигнала в такой структуре ранее не выполнялся. Поэтому цель данной работы – выполнить анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сигнала в конце МЛ с витками со слабой связью. Для достоверности результатов целесообразно выполнить моделирование квазистатическим и электродинамическим подходами.

### Параметры исследуемой МЛ

Исходная линия состоит из двух сигнальных проводников, соединенных на одном конце и лежащих на диэлектрической подложке, и опорного проводника в виде идеально проводящей плоскости (рис. 1, а). Основа линии выполнена из двустороннего фольгированного материала Rogers 4003С с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3,38 \pm 0,05$ , измеренной на частоте 10 ГГц (при  $T = 23$  °С), с толщинами диэлектрика 0,508 мм и фольги 35 мкм. Ближний конец первого проводника линии длиной  $l$  соединен с источником сигнала, представленным на схеме идеальным источником ЭДС с внутренним сопротивлением  $R_1$ , а ближний конец второго – с приемным устройством, представленным сопротивлением  $R_2$  (см. рис. 1, б). Значения сопротивлений приняты по 50 Ом.

Значения  $w = 300$  мкм и  $s = 100$  мкм обеспечивают погонные задержки четной и нечетной мод 5,41 и 4,81 нс/м соответственно, что позволяет разложить при длине  $l = 1$  м СКИ с длительностью 1,2 нс, без учета влияния потерь и дисперсии [6].

Рассмотрена аналогичная линия длиной 1 м на плате с размером  $80 \times 80$  мм<sup>2</sup>. Для размещения исходной МЛ на плате сформирован меандр из  $N$  витков со слабой связью между ними для минимизации перекрестных связей. Поперечное сечение и схема соединения приведены на рис. 2.

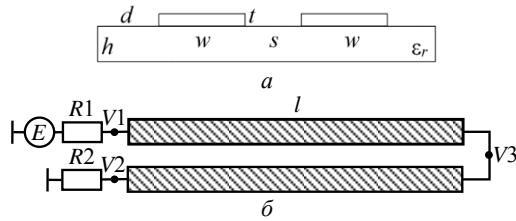


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединения (б) исходной МЛ

Для минимизации перекрестных связей принято  $s_2=10w$ . Для возможности проведения измерений такой линии необходим монтаж соединителей для подключения измерительной аппаратуры. Поэтому из исходного витка МЛ сформирована линия с  $N=19$  и длиной полувитка  $l_{\pi}=65,86$  мм (без учета скруглений на конце). При этом общая длина проводника линии составила 2502,68 мм.

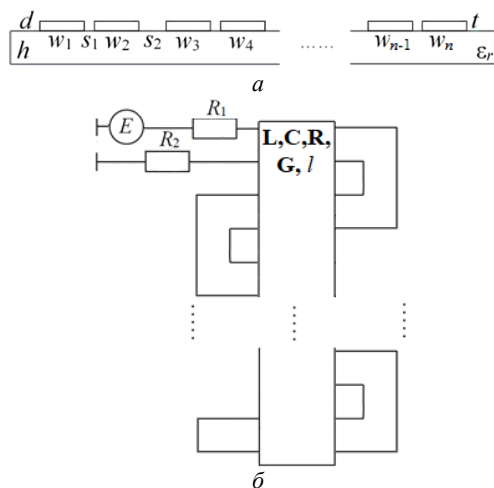


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) МЛ с витками со слабой связью

### Результаты моделирования

В качестве воздействующего сигнала принят импульс трапецеидальной формы с общей длительностью 900 пс (длительности фронта, плоской вершины и спада по 300 пс). Для учёта потерь при квазистатическом анализе вычислены погонные матрицы  $\mathbf{R}$  (потери в проводниках) и  $\mathbf{G}$  (потери в диэлектрике), которые затем использованы для вычисления временного отклика. Вычисление матрицы  $\mathbf{G}$  выполнено с учетом тангенса угла диэлектрических потерь материала  $\tan\delta=0,0027$ , а матрицы  $\mathbf{R}$  – скин-эффекта, эффекта близости и потерь в плоскости земли [7].

На рис. 3 представлены результаты, полученные при квазистатическом и электродинамическом анализе. Из результатов видно, что полученные формы сигнала хорошо согласуются качественно и количественно для всех рассматриваемых случаев учета потерь. Так, в конце линии наблюдаются три основных импульса, а учет потерь приводит к характерному сглаживанию (из-за затягивания фронта и спада) форм сигнала. Из результатов также видно, что потери в диэлектрике лишь незначительно влияют на форму сигнала. Очевидно, что это связано с малыми потерями в проводниках в связи с малым значением  $\tan\delta$ . Максимальное уменьшение амплитуды по результатам квазистатического анализа составило 7 мВ (2,8% от максимальной амплитуды), а электродинамического – 6 мВ (2,5%). Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на форму сигнала: максимальная амплитуда сигнала по результатам квазистатического анализа уменьшается с 251 до 191 мВ (24% от максимальной амплитуды), а электродинамического – с 257 до 188 мВ (26,9%).

Для наглядности в таблицу сведены вычисленные амплитуды первого ( $V1$ ), второго ( $V2$ ) и третьего ( $V3$ ) импульсов разложения.

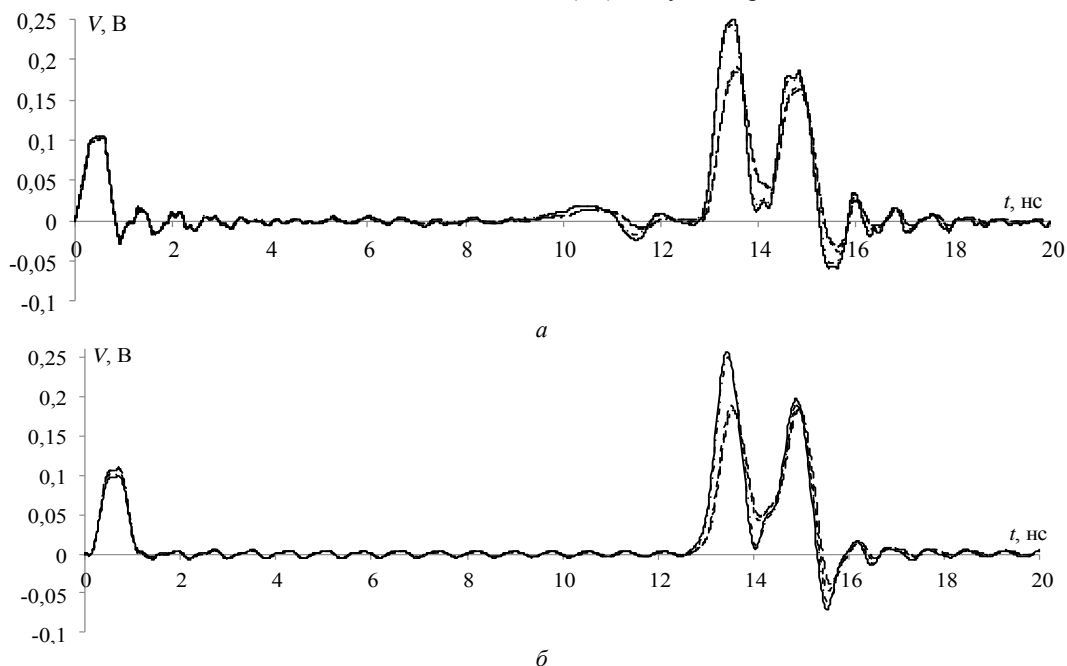


Рис. 3. Формы напряжения в конце линии без учёта потерь (—), с учётом потерь в проводниках (---), диэлектрике (-.-), в проводниках и диэлектрике (-.-), полученные при квазистатическом (а) и электродинамическом (б) анализах

В таблице потери в проводниках обозначены как I, в диэлектрике – II, на излучение – III. При электродинамическом анализе учитываются все типы волн. Поэтому в результатах моделирования всегда учитываются потери на излучение.

**Вычисленные амплитуды импульсов разложения (V, мВ)**

Вид потерь			V1	V2	V3
I	II	III			
Квазистатистический анализ					
-	-	-	105	251	187
+	-	-	102	191	169
-	+	-	105	244	179
+	+	-	102	186	163
Электродинамический анализ					
-	-	+	99	257	197
+	-	+	106	188	188
-	+	+	103	251	193
+	+	+	110	183	184

Из таблицы видно, что при электродинамическом анализе учёт потерь приводит к увеличению амплитуды первого импульса V1 (перекрёстной наводки) и уменьшению амплитуды импульсов разложения (четной V2 и нечетной V3 мод). В результате потери оказывают наибольшее влияние на второй импульс (нечетную моду), тогда как амплитуда третьего импульса (четной моды) при учёте всех потерь уменьшается на 13 и 6,7% по результатам квазистатистического и электродинамического анализов соответственно. Причиной незначительных различий между формами и амплитудами сигнала (не более 2,5%), вероятно, является учёт потерь на излучение при электродинамическом анализе.

**Заключение**

Представлены результаты квазистатистического и электродинамического анализов влияния потерь на форму и амплитуду СКИ в витке МЛ с сильной торцевой связью, свернутом в N = 19 витков со слабой связью для размещения на печатной плате размером 80×80 мм<sup>2</sup>. В результате выявлено, что потери в диэлектрике оказывают влияние лишь на изменение формы и амплитуды второго и третьего импульсов разложения СКИ в конце витка МЛ, однако это влияние не существенно (не более 2,8%). Столь слабое влияние потерь в диэлектрике обусловлено малым тангенсом угла диэлектрических потерь материала. Потери в проводниках оказывают более существенное влияние на уменьшение амплитуды импульсов разложения (до 26,9%). Наибольшее влияние потери в линии оказывают на изменение амплитуды второго импульса, в результате чего ослабление СКИ в линии

увеличивается в 1,35 раза, поскольку амплитуда второго импульса является максимальной. Причиной незначительных (не более 2,5% по амплитуде) различий результатов квазистатистического и электродинамического анализов, вероятнее всего, является учёт потерь на излучение при электродинамическом анализе.

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (проект №19-37-51017).

*Литература*

1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий: сборник / М. Бакстром, К.И. Баум, Р. Борисов и др.; ред. Т.Р. Газизов. – Томск: ТГУ, 2002. – 206 с.
2. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
3. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1864–1871.
4. Surovtsev R.S. Influence of losses on ultrashort pulse decomposition in a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.T. Gazizov // 17th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. – June 30 – July 4, 2016. – P. 151–154.
5. Карри С.Х. Анализ рассеяния мощности сверхкороткого импульса в витке меандровой линии задержки // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, 28–30 ноября, 2018. – С. 283–286.
6. Носов А.В. Анализ влияния количества витков со слабой связью на форму напряжения в конце витка защитной меандровой линии / А.В. Носов, С. Карри, Р.С. Суровцев // Вторая Междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации (Шарыгинские чтения). – 2021 [принята к печати].
7. Matthaei G.L. Approximate calculation of the high-frequency resistance matrix for multiple coupled lines / G.L. Matthaei, G.C. Chinn // IEEE MTT-S Microwave symposium digest. – 1992. – P. 1353–1354.

**Карри Салим**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: karrisalim.h@gmail.com

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент, каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

В.А. Трубоченинов, Н.О. Кузьмин, В.А. Сурков, Е.С. Жечев

## Соединительные платы для проведения измерений модальных фильтров с круговым сечением

Описана разработка соединительных печатных плат (ПП) для модальных фильтров с круговым сечением, с помощью которых выполнен анализ частотных и временных характеристик фильтров. В системе ADS получены коэффициенты передачи и отражения трёх структур соединительных ПП в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц. Используя субтрактивный метод изготовления ПП, подготовлены макеты на двухстороннем фольгированном стеклотекстолите.

**Ключевые слова:** печатная плата, модальный фильтр с круговым сечением, измерения, электромагнитная совместимость.

Из-за увеличения плотности монтажа электронных компонентов, рабочих мощностей и частот сигналов растут требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Промышленное и специализированное электромеханическое, электрическое и электронное оборудование при своей работе способно генерировать электромагнитные помехи, оказывающие негативное влияние на работу электронных устройств, таких как датчики, приемопередающие устройства, программируемые контроллеры и т.д. [1].

Невыполнение требований ЭМС РЭА способно привести к частичному или полному её отказам. Помимо излучаемых помех, крайне важно защищать электронное оборудование от кондуктивных воздействий, проникающих в РЭА по проводникам [2]. Одним из опасных видов такого рода помех являются импульсы малой длительности или сверхкороткие импульсы (СКИ) [3]. Классические методы помехозащиты зачастую не способны должным образом подавить СКИ из-за его широкого спектра, малой длительности и большой мощности [4]. Для защиты РЭА от СКИ известна технология модальной фильтрации и устройства на ее основе – модальные фильтры (МФ) [5, 6]. Чаще всего такие устройства реализуются в виде микрополосковых и полосковых структур на печатных платах (ПП) [7, 8].

Однако такой способ изготовления МФ слабо применим при защите межсоединений различных функциональных блоков РЭА. Тогда применяют МФ с круговым сечением, представляющие собой кабель с сильно электрически связанными проводниками [9]. Ранее проведен ряд вычислительных экспериментов во временной и частотной областях, однако верификационный эксперимент не был выполнен [10, 11]. При изготовлении МФ с круговым сечением разместить отводы или переходы для соединения с измерительным оборудованием затруднительно. Ранее изготовлены три МФ с круговым сечением. Однако, для проведения экспериментального исследования их частотных и временных характеристик необходимы специализированная оснастка или соединительные ПП.

Цель данной работы – представить результаты разработки и анализа соединительных ПП для МФ с круговым сечением.

### Структура, материалы и методы

Поперечные сечения изготовленных МФ с круговым сечением представлены на рис. 1. Изоляция всех кабелей выполнена из ПВХ-пластика.

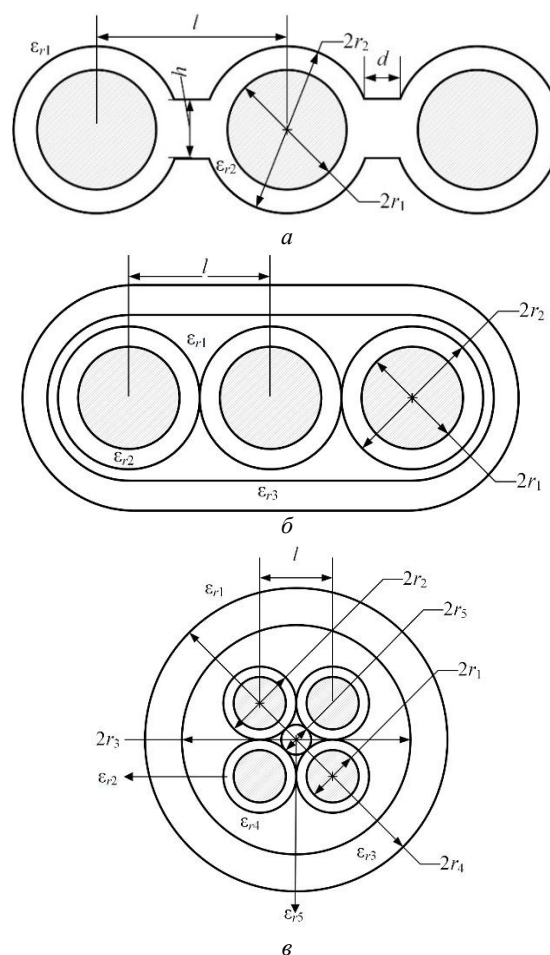


Рис. 1. Поперечное сечение МФ с круговым сечением: 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Геометрические параметры МФ 1 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,3$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,07$ ; длина разделительного основания (изоляция)  $d = 0,9$ ; толщина разделительного основания (изоляция)  $h = 0,6$ . Значения относительных диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{r1} = 1$  и  $\epsilon_{r2} = 3,4$ .

Геометрические параметры МФ2 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,4$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,4$ ; толщина внешней изоляции  $h = 0,95$ ; расстояние между оплеткой и изоляцией  $b = 0,15$ . Значения  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 3,0$ , и  $\epsilon_{r3} = 3,5$ .

Геометрические параметры МФ 3 (мм): радиус проводников  $r_1 = 1,88$ ; радиус изоляции  $r_2 = 2,82$ ; толщина внешней изоляции  $h = 1,5$ ; радиус внутренней изоляции  $r_3 = 7,75$ ; радиус диэлектрика в виде ПВХ-шнура  $r_5 = 1,22$ ; радиус структуры  $r_4 = 9,3125$ . Значения  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = 3,4$ ,  $\epsilon_{r3} = 4,6$ ,  $\epsilon_{r4} = 2,8$  и  $\epsilon_{r5} = 4,6$ .

ПП должны удовлетворять следующим условиям: вносимое затухание в диапазоне от 0 до 2 ГГц должно быть не более 1 дБ; работа в коаксиальном тракте; возможность подключения коаксиальных согласованных нагрузок. Исходя из указанных требований в системе проектирования EasyEDA [12], разработаны 2 макета соединительных ПП.

На рис. 2 представлены фотошаблоны ПП. Геометрические размеры шаблона для МФ1 и 2:  $a = 26,1$  и  $b = 21$  мм, а для МФ3 –  $a = 32$  и  $b = 32$  мм. В конфигурациях МФ1 и 2 центральный проводник является опорным, а два крайних – активным и пассивным. Измерительное оборудование в тракте 50 Ом подключается к активному проводнику, при этом на ближний и дальний концы пассивного проводника подключаются согласованные нагрузки. В случае МФ3 опорным проводником может быть любой проводник или их комбинация. Однако наилучший результат показывает конфигурация с двумя опорными проводниками, находящимися по диагонали относительно друг друга.

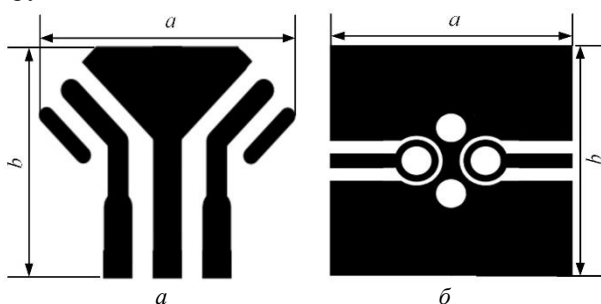


Рис. 2. Фотошаблон верхних слоев соединительных ПП для МФ1, 2 (а) и 3 (б)

В качестве материала выбран двухсторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной основания 1,5 мм. Нижний слой фотошаблонов представляет собой сплошной полигон. Для макета МФ3 на нижнем слое предусмотрены зазоры между отверстиями и полигоном, необходимые для того, чтобы активный и пассивный проводники не имели электрической связи с полигоном. (Подразумевается, что залуженные проводники МФ с круговым сечением припаиваются к дорожкам макетов, обеспечивая надежный контакт.)

Для изготовления макетов ПП выбран субтрактивный метод. Так, с помощью пленочного фоторезиста, ультрафиолетовой лампы и разработанных фотошаблонов на ПП переносился необходимый рисунок. После его проявления в растворе кальцинированной

соды заготовки травились в растворе хлорного железа. Полученные ПП лудились с помощью припоя ПОС-63. Затем к ним припаивались коаксиально-микрополосковые переходы SMA-9223/1.6 и проводники МФ.

### Результаты моделирования

Для анализа частотных характеристик макетов выполнено их электродинамическое моделирование в системе ADS [13]. Структура разбивалась на ячейки, максимальный и минимальный размер которых автоматически подбирался средой моделирования. Далее на основе коэффициентов передачи и отражения проверялась сходимость результатов. Моделирование макетов ПП проводилось в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц.

На рис. 3 представлены частотные зависимости модулей коэффициентов отражения  $|S_{11}|$  и передачи  $|S_{21}|$  макетов ПП.

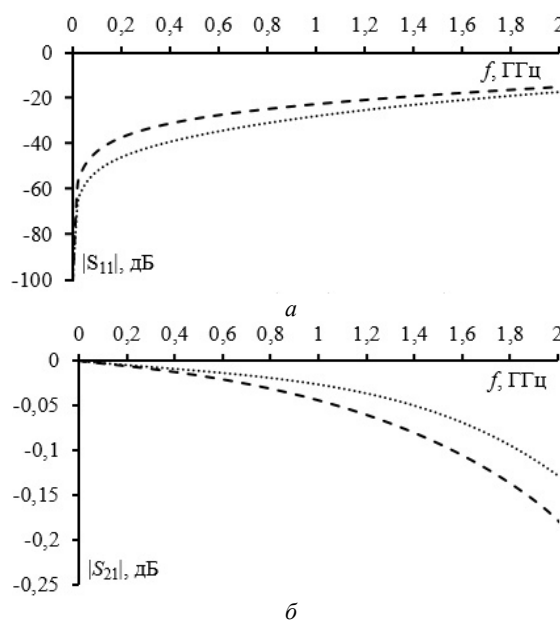


Рис. 3. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (а) и  $|S_{21}|$  (б) макетов ПП для МФ 1, 2 (—) и 3 (···)

Из рисунка видно, что платы согласованы, а уровень вносимых затуханий не превышает 0,2 дБ. Характеристика вносимых потерь, представленная в виде коэффициента передачи, является монотонно убывающей. Из графиков точно видно, что в частотном диапазоне от 0 до 2 ГГц отсутствуют различные резонансы. Однако характеристики, полученные в ходе моделирования, могут сильно отличаться от полученных в ходе реального эксперимента. Так, существенное влияние будут оказывать жилы проводов МФ и их монтаж на дорожки ПП. На уровень вносимых потерь также будут оказывать влияние реальные значения потерь в диэлектрике из-за частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости подложки. При этом следует учитывать уровень вносимого затухания коаксиально-микрополосковых переходов. Однако в заданном частотном диапазоне даже у дешевых изделий характеристики измеримы с полученными для соединительных ПП.



На рис. 4 представлены изготовленные макеты соединительных ПП с подключенными МФ. Видно, что на ПП установлены коаксиально-микроразъемные переходы, а залуженные проводники МФ запаиваются в соответствующие контактные площадки.

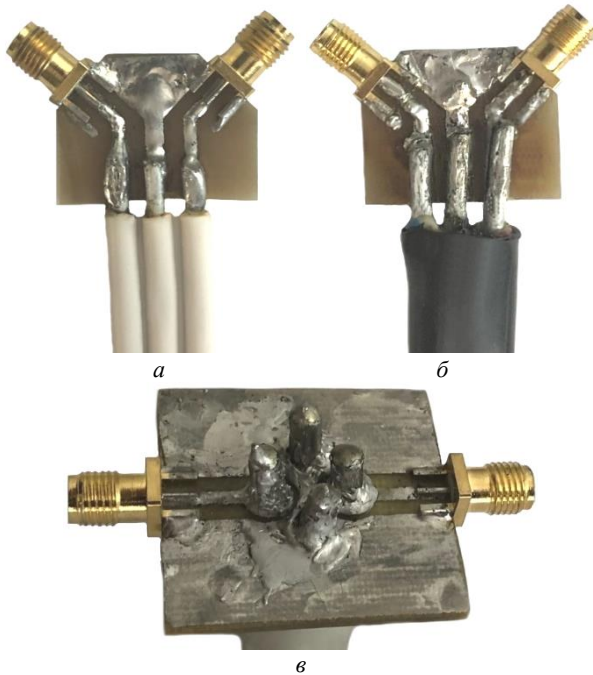


Рис. 4. Изготовленные макеты соединительных ПП с подключенными МФ1 (а), 2 (б) и 3 (в)

### Заключение

В работе представлены изготовленные макеты соединительных ПП для МФ с круговым сечением. По результатам электродинамического моделирования выявлено, что уровень вносимых потерь не превышает 0,2 дБ. Конфигурация ПП позволяет подключить измерительное оборудование как к активному, так и к пассивному проводникам МФ. Также с помощью коаксиальных нагрузок можно задавать различные граничные условия. В дальнейшем разработанные ПП будут использованы при проведении экспериментальных исследований во временной и частотной областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00446) в ТУСУРе.

### Литература

1. Genender E. Probabilistic risk analysis technique of intentional electromagnetic interference at system level / E. Genender, H. Garbe, F. Sabath // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2014. – Vol. 56, No. 1. – P. 200–207.
2. Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. – Казань, 2014. – 142 с.

3. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – 2014. – 41 p.

4. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J. L. terHaseborg // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 423–430.

5. Заболоцкий А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Технологии ЭМС. – 2006. – № 4. – С. 40–44.

6. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – № 3. – С. 79–83.

7. Gazizov A.T. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov // Journal of communications technology and electronics. – 2018. – Vol. 63, No. 3. – P. 270–276.

8. Zhechev Y.S. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter / Y.S. Zhechev, E.B. Chernikova, A.O. Belousov // IEEE 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – 2019. – P. 108–112.

9. Gazizov T.R. Modal decomposition of UWB pulse in power cable structures: Simple experiment showing useful possible applications / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Book of abstracts EUROEM. – 2008. – Vol. 21. – P. 62.

10. Самотин И.Е. Устройства защиты вычислительной техники и систем управления путем модального разложения импульсов помех в кабельных и полосковых структурах: дис. ... канд. техн. наук. – Том. гос. ун-т, 2011. – 119 с.

11. Белоусов А.О. Модальное разложение сверхкороткого импульса в многопроводных линиях передачи с круговой симметрией / А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий // 11-я Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2015. – № 1-2. – С. 14–18.

12. Работа в EasyEDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа свободный <https://easyeda.com/> (дата обращения: 25.07.2021).

13. Создание макета ПП в ADS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (дата обращения: 26.07.2021).

### Трубченинов Вячеслав Анатольевич

Студент каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: slava.trubcheninov@mail.ru

### Кузьмин Никита Олегович

Студент каф. ТУ ТУСУР  
Эл. почта: kuzjmin.nikita23@gmail.com

### Сурков Вячеслав Андреевич

Студент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: vaceslavsurkov56@gmail.com

### Жечев Евгений Сергеевич

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0003-4469-7033  
Эл. почта: zhechev75@gmail.com

УДК 621.372.22

Р.С. Суровцев, Н.А. Царегородцев, К.П. Малыгин

## Распространение затухающей синусоиды в витке меандровой линии с воздушным заполнением

Представлены первые результаты анализа распространения затухающего синусоидального сигнала с частотами 1 и 10 ГГц в витке меандровой линии с воздушным заполнением. Выявлено, что при оптимальном выборе параметров поперечного сечения и длины линии можно добиться ослабления амплитуды напряжения в конце линии за счет взаимной компенсации полуволн разных знаков наведенного и основного сигналов. Показано максимальное ослабление напряжения с частотой 1 ГГц в 2,3 раза, а с частотой 10 ГГц – в 1,9 раза.

**Ключевые слова:** электромагнитное воздействие, устройство защиты, меандровая линия.

Одним из этапов при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) является обеспечение требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Особое внимание при этом уделяется защите РЭС от электромагнитных воздействий (ЭМВ). Такие воздействия могут быть как результатом преднамеренных действий человека (преднамеренные ЭМВ), так и результатом естественных природных явлений (вторичные проявления грозового разряда, электростатический разряд и пр.) [1]. Одним из опасных ЭМВ являются сверхкороткие импульсы (СКИ) наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Опасность СКИ заключается в широком спектре, из-за которого СКИ может проникать внутрь РЭС через щели в корпусах и экранах устройств, а наведенные сигналы от СКИ могут восприниматься логическими элементами в качестве полезных и приводить к их ложному срабатыванию. Из-за этого нарушается передача цифровой информации [2]. Типовыми формами воздействий, которые используются для тестирования устройств на устойчивость к ЭМВ, являются одиночный импульс [3], затухающая синусоида [4] и пачки непрерывных волн, как правило, синусоидальных [5]. Не всегда традиционные средства защиты способны обеспечить должную защиту от таких воздействий из-за недостатка быстродействия или мощности [6]. Поэтому поиск альтернативных подходов к защите РЭС актуален.

Новым подходом к защите РЭС является разложение СКИ в простых печатных структурах в форме витка меандра на последовательность импульсов меньшей амплитуды [8]. Недостатком указанных исследований является то, что они выполнены только для идеализированного одиночного импульса. Между тем анализ возможности защиты от других видов воздействия видится необходимым. Для этого анализа сначала целесообразно выполнить исследование распространения затухающей синусоиды в витке МЛ с воздушным заполнением. Из-за однородности диэлектрического заполнения такой структуры моды сигнала будут иметь одинаковые скорости распространения, и анализ существенно упрощается. Поэтому цель данной работы – выполнить такой анализ.

### Исходные данные для моделирования

На рис. 1 показан вид поперечного сечения МЛ со следующими параметрами:  $w = 100$  мкм,  $t = 105$  мкм,

$s = 100$  мкм,  $h = 300$  мкм [9]. Схема соединения исследуемой линии представлена на рис. 2. Спротивления  $R1$  и  $R2$  при моделировании приняты по 50 Ом, амплитуда ЭДС  $E_T = 1$  В. В качестве воздействующего сигнала принята затухающая синусоида частотой  $f_0 = 1$  ГГц и коэффициентом затухания  $\beta = 1/\tau_c = 10^9$ , где  $\tau_c = 1$  нс – время, за которое амплитуда синусоиды ( $U_0$ ) уменьшается в  $e$  раз ( $e = 2,72$ ). Пример формы такого сигнала показан на рис. 3.

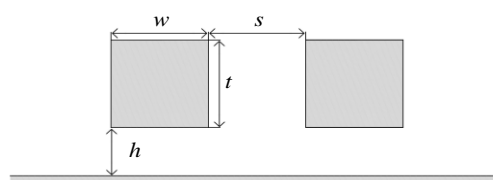
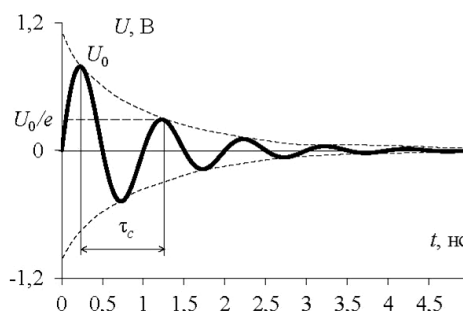


Рис. 1. Поперечное сечение МЛ



Рис. 2. Схема соединения МЛ в воздухе

Рис. 3. Затухающая синусоида при  $f_0 = 1$  ГГц и  $\beta = 10^9$ 

### Результаты моделирования при частоте воздействия $f_0 = 1$ ГГц

Оценено искажение затухания синусоиды с  $f_0 = 1$  ГГц в конце линии с фиксированным  $s = 100$  мкм при изменении длины линии в диапазонах: 1, 5, ..., 25, 30, 40, ..., 90 мм. Для примера на рис. 4 показаны результаты формы напряжения в начале и конце витка при  $l = 20, 50$  и 80 мм.

Из рис. 4 видно, что увеличение длины линии приводит к последовательному разложению первой положительной полуволны на две составляющие,

первая из которых является наведенной и приходит к концу линии без задержки, а вторая – основным сигналом, пришедшим к концу линии с задержкой в витке МЛ. Также наблюдается частичное попадание полуволн наведенной и основной синусоиды в противофазу, из-за чего происходит частичная компенсация амплитуды сигнала в конце линии. Выявлено, что минимальная амплитуда сигнала на выходе наблюдается при  $l = 80$  мм и составляет 255 мВ при максимальной амплитуде сигнала в начале линии 544 мВ, т.е. ослабление составило до 2,1 раза.

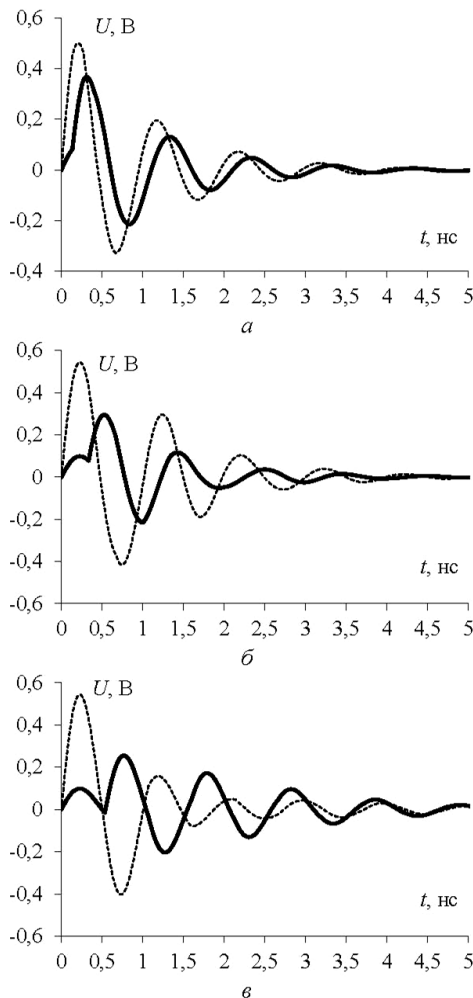


Рис. 4. Формы напряжения в начале (---) и конце (—) МЛ при  $f_0 = 1$  ГГц для  $l = 20$  (а), 50 (б) и 80 (в) мм

Выполнен анализ влияния расстояния между проводниками на форму напряжения в конце линии. Моделирование выполнено при  $l = 90$  мм и изменении  $s$  от 100, 80, ..., 20 мкм. Для примера на рис. 5 показаны результаты для  $s = 100, 60$  и 20 мкм.

Из рис. 5 видно, что уменьшение  $s$  приводит к последовательному увеличению амплитуды первой и второй положительных полуволн сигнала в конце линии. Это происходит в результате двух явлений. Первое является следствием усиления связи между проводниками, за счет чего увеличивается амплитуда положительной полуволны наведенного сигнала и уменьшается амплитуда положительной полуволны

основного сигнала. Второе заключается в компенсации положительной полуволны основного сигнала отрицательной полуволной наведенного, что в совокупности с первым явлением приводит к более существенному ослаблению амплитуды сигнала на выходе. Из рис. 5, в видно, что  $s = 20$  мкм является оптимальным, поскольку амплитуды трех положительных полуволн практически совпадают (ослабление сигнала до 2,3 раза).

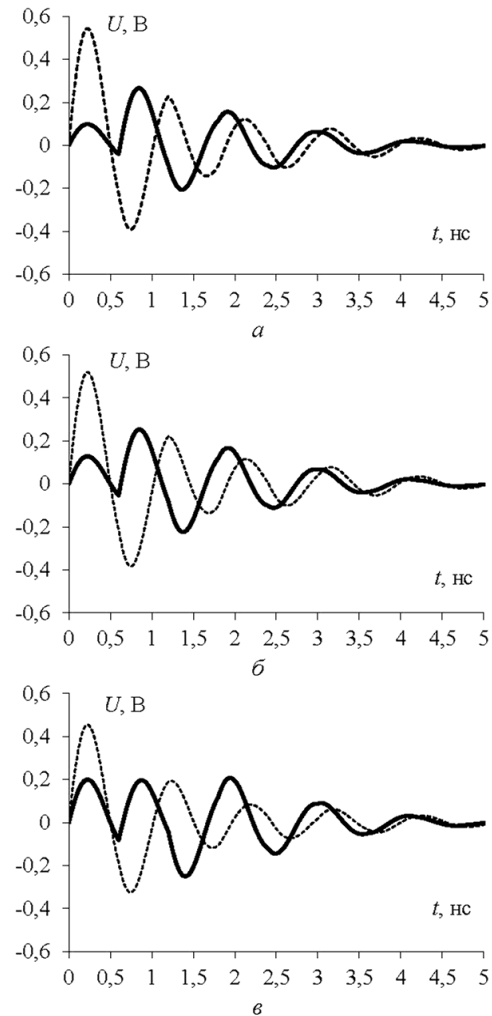


Рис. 5. Формы напряжения в начале (---) и конце (—) исследуемой линии при  $f_0 = 1$  ГГц для  $s = 100$  (а), 60 (б) и 20 (в) мкм

#### Результаты моделирования при $f_0 = 10$ ГГц

Получены аналогичные результаты при  $f_0 = 10$  ГГц. Результаты при  $s = 100$  мкм для  $l = 20, 50$  и 90 мм приведены на рис. 6, из которых видно, что при увеличении  $l$  происходит последовательное разложение исходного и наведенного сигналов. Минимальная амплитуда сигнала в конце линии составила 347 мВ, что при амплитуде сигнала в начале линии 672 мВ дает ослабление сигнала в 1,93 раза.

Оценено влияние  $s$  на форму напряжения в конце линии. Моделирование, как и прежде, выполнено при  $l = 90$  мм и изменении  $s = 100, 80, \dots, 20$  мм. Полученные результаты для  $s = 100, 60$  и 20 мкм приведены на рис. 7, из которых видно, что усиление связи

между проводниками ведет к увеличению амплитуды наведенного сигнала и уменьшению амплитуды основного сигнала.

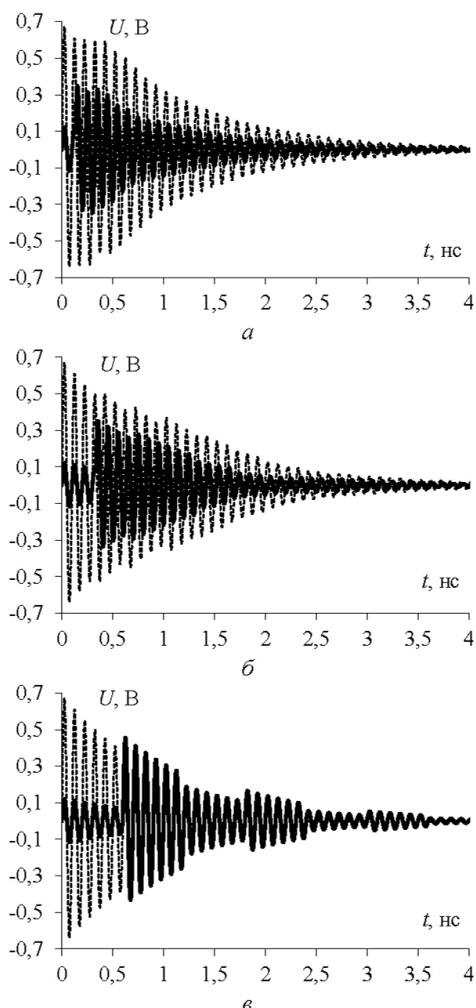


Рис. 6. Формы сигнала в начале (---) и конце (—) МЛ при  $f_0 = 10$  ГГц для  $l = 20$  (а), 50 (б) и 90 (в) мм

Однако из-за неоптимального выбора длины линии (задержка составила 600 пс), в отличие от случая с  $f_0 = 1$  ГГц, происходит наложение положительных составляющих наведенного основного сигналов, что приводит к последовательному росту общей амплитуды сигнала в конце линии. Также уменьшение  $s$  приводит к более явному периодическому характеру изменения формы сигнала, возникающего из-за влияния отраженных сигналов. Минимальная амплитуда сигнала на выходе витка получена при  $l = 90$  мм и составила 453 мВ, что при амплитуде сигнала в начале линии 673 мВ обеспечивает ослабление в 1,48 раза.

В результате, сравнивая полученные ослабления при изменении  $f_0$  (2,3 раза для  $f_0 = 1$  ГГц и 1,48 раза для  $f_0 = 10$  ГГц), можно сделать вывод о необходимости более обстоятельного моделирования для выявления оптимальных комбинаций параметров поперечного сечения и длины линии для выявления пределов ослабления амплитуды сигнала. В первую очередь, целесообразен более детальный анализ влияния  $s$  при других значениях  $l$ . Примечательно, что выбор  $l$  обязательно должен быть оптимальным. Поскольку

увеличение связи оказывает существенное влияние на погонную задержку линии, то ее изменение может привести как к уменьшению (за счет одновременного прихода и наложения положительных и отрицательных составляющих), так и увеличению (из-за одновременного прихода и наложения составляющих одинаковой полярности) амплитуды выходного сигнала.

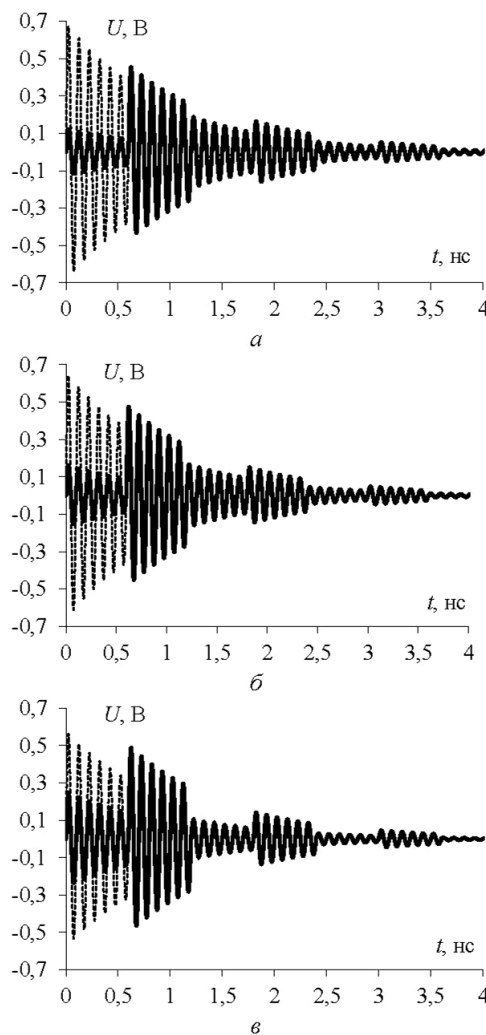


Рис. 7. Формы сигнала в начале (---) и конце (—) МЛ при  $f_0 = 10$  ГГц для  $s = 100$  (а), 60 (б) и 20 (в) мкм

### Заключение

Представлены первые результаты анализа распространения затухающего синусоидального воздействия в витке меандровой линии с воздушным заполнением. Оценено влияние длины витка и расстояния между проводниками линии на изменение амплитуды выходного сигнала для двух частот синусоиды 1 и 10 ГГц. Выявлено, что при оптимальном выборе параметров поперечного сечения и длины линии можно добиться ослабления амплитуды сигнала в конце линии за счет взаимной компенсации полуволн разных знаков наведенного и основного сигналов. Показано, что максимальное ослабление сигнала с частотой 1 ГГц составляет 2,3 раза, а с частотой 10 ГГц – 1,9 раза. Уменьшение ослабления при увеличении частоты обусловлено выбором длины линии, которая обеспечивает синфазный приход положительных по-

луволи наведенного и основного сигналов. Выбор длины линии не обязательно должен быть оптимальным, поскольку увеличение связи оказывает существенное влияние на погонную задержку линии. Поэтому изменение длины может привести как к уменьшению, так и увеличению амплитуды выходного сигнала.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

#### *Литература*

1. Носов А.В. Совершенствование защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов за счет меандровых линий задержки: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.04. – Томск, 2018. – 188 с.
2. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–3.
3. JOLT: a highly directive, very intensive, impulse-like radiator / C. Baum, W. Baker, W. Prather, J. Lehr, J.O. Loughlin, D. Giri, et al. // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92. – P. 1096–1109.
4. Interaction between geometric parameters and output waveforms in high-power quarterwave oscillators / M. Armanious, J. Tyo, M. Skipper, M. Abdalla, W. Prather, J. Lawrence // IEEE, Transactions on plasma science. – 2010. – Vol. 38. – P. 1124–1131.
5. Backstrom M. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience / M. Backstrom, K. Lovstrand // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2004. – Vol. 46. – P. 396–403.
6. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.
7. Surovtsev R.S. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – P. 1864–1871.
8. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2015. – 248 с.
9. Surovtsev R.S. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of siberian conference on control and communications (SIBCON). – Omsk, Russia, May 2015. – 5 p.

---

#### **Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

#### **Царегородцев Никита Андреевич**

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: nt89539280529nt@gmail.com

#### **Малыгин Константин Петрович**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: malyginkp@gmail.com

*Секция 14*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

*Председатели секции – **Кориков Анатолий Михайлович**, профессор каф. АСУ, д-р техн. наук;  
**Катаев Михаил Юрьевич**, профессор каф. АСУ, д-р техн. наук*



УДК 519.163

Ю.В. Шапля, А.Д. Бобков

## Разработка алгоритмов ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга

Рассматривается задача разработки новых алгоритмов комбинаторной генерации с помощью метода, основанного на представлении комбинаторных множеств в виде структуры дерева И / ИЛИ, на примере комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга. Совокупность разработанных новых комбинаторных алгоритмов для множества вариантов дерева И / ИЛИ и полученных ранее правил биекции позволяет организовать процесс ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга.

**Ключевые слова:** комбинаторная генерация, дерево И / ИЛИ, ранжирование, генерация по рангу, диаграмма Юнга, стандартная таблица Юнга.

Интенсивное развитие информационных технологий на фоне формирования цифровой экономики приводит к экспоненциальному росту объёмов различного рода данных, которые также носят распределённый характер. Таким образом, возникает проблема организации процесса хранения, передачи и обработки большого объёма данных. Современные системы обработки информации для своего функционирования требуют наличия методического, алгоритмического, программного и технического обеспечения, позволяющего эффективно организовать процесс обработки информации. Направление комбинаторной генерации [1, 2], объединяющее в себе теоретические основы дискретной математики и информатики, содержит такие научные подходы и методы, которые делают возможным решение части задач по обработке информации.

### Диаграммы и таблицы Юнга

Такие комбинаторные объекты, как диаграммы Юнга, активно используются при решении задач из области теории групп, связанных с представлением и обработкой абстрактных алгебраических структур. Ещё одним вариантом практического применения диаграмм Юнга является их использование для представления систем с упорядоченным заполнением состояний [3]. Также математический аппарат диаграмм Юнга находит применение при построении моделей распределения частиц по энергетическим уровням [4] и исследовании роста и плавления кристаллов [5]. Следовательно, разработка новых алгоритмов, способствующих повышению эффективности обработки структур диаграмм Юнга, является актуальным научным направлением.

Диаграммой Юнга размера  $n$  называется набор из  $n$  клеток, выровненных по левому краю, в котором значения количества клеток в каждой строке данного набора клеток образуют невозрастающую последовательность. Диаграммы Юнга размера  $n$  также задают удобную форму представления для разбиений натурального числа  $n$ . Если все клетки диаграммы Юнга размера  $n$  заполнить значениями от 1 до  $n$ , то будет получен новый комбинаторный объект, называемый таблицей Юнга размера  $n$ . При этом если данные значения расположены таким образом, что они возрастают слева направо в рамках каждой строки и возрастают

сверху вниз в рамках каждого столбца, то такая таблица Юнга называется стандартной [6].

Количество всех возможных вариаций стандартных таблиц Юнга размера  $n$  формирует целочисленную последовательность A000085 в OEIS [7]:

1, 1, 2, 4, 10, 26, 76, 232, 764, 2620, 9496, 35696, ...

Можно отметить, что значения данной последовательности увеличиваются с огромной скоростью относительно параметра  $n$  (наблюдается экспоненциальный рост). В таком случае работа с комбинаторным множеством стандартных таблиц Юнга становится вычислительно трудоёмкой задачей. Методы комбинаторной генерации позволяют упростить обработку таких комбинаторных множеств за счёт применения специальных комбинаторных алгоритмов. В рамках данной работы предлагается разработка новых алгоритмов комбинаторной генерации для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга, а именно алгоритмов ранжирования и генерации по рангу. Алгоритм ранжирования позволит кодировать отдельно взятую стандартную таблицу Юнга в виде числа, называемого рангом комбинаторного объекта, а алгоритм генерации по рангу позволит обратно восстановить исходную стандартную таблицу Юнга по заданному рангу.

### Представление множества стандартных таблиц Юнга в виде структуры дерева И / ИЛИ

В качестве базового подхода к разработке новых алгоритмов комбинаторной генерации для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга предлагается применение метода, основанного на представлении комбинаторных множеств в виде структуры дерева И / ИЛИ [8]. Возможность применения данного метода обосновывается наличием функции мощности рассматриваемого комбинаторного множества, принадлежащей требуемой алгебре:

$$A(n) = A(n-1) + (n-1) \cdot A(n-2), \quad (1)$$

$$A(0) = A(1) = 1.$$

На основе рекуррентного соотношения (1) для функции мощности комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга размера  $n$  в ходе предыдущего этапа исследований была получена соответствующая данному комбинаторному множеству структура дерева И / ИЛИ, а также правила биективного отобра-



жения между комбинаторным множеством и множеством вариантов дерева И / ИЛИ [9].

Для компактности отображения результатов каждый вариант дерева И / ИЛИ кодируется последовательностью  $v = (v_1, v_2, \dots)$ , где  $v_i$  определяется значением выбранного в варианте дерева И / ИЛИ ребра на  $i$ -м уровне:  $v_i = 0$  для перехода по левой ветви  $A(n-1)$ ,  $v_i = k$  для перехода по правой ветви  $(n-1) \cdot A(n-2)$ , где  $k$  соответствует метке выбранного сына в рамках узла, помеченного  $(n-1)$ . При этом однозначное сопоставление варианта дерева И / ИЛИ и стандартной таблицы Юнга задаётся следующими формулами:

1)  $T_n = T_{n-1} + (n)$  для  $v_i = 0$  (соответствует добавлению к стандартной таблице Юнга размера  $n-1$  клетки со значением  $n$  в рамках новой строки);

2)  $T_n = T_{n-2} + (k, n)$  для  $v_i = k$  (соответствует добавлению к стандартной таблице Юнга размера  $n-2$  клетки со значением  $k$  на основе операции вставки Шенстеда [10], а также клетки со значением  $n$  в рамках следующей строки относительно добавленной клетки в ходе реализации вставки Шенстеда).

Рассмотрим пример представления комбинаторного множества таблиц Юнга в виде структуры дерева И / ИЛИ для  $n = 4$ . Мощность такого комбинаторного множества, а также количество вариантов соответствующего ему дерева И / ИЛИ определяются значением  $A(4) = 10$ . Подробная структура дерева И / ИЛИ для  $A(4)$  представлена на рис. 1. В табл. 1 представлен перечень всех возможных вариантов дерева И / ИЛИ для  $A(4)$ , соответствующие им формулы построения таблиц Юнга, а также итоговый вид полученных стандартных таблиц Юнга.

#### Алгоритмы ранжирования и генерации по рангу для множества стандартных таблиц Юнга

В ходе следующего этапа исследований на основе полученного представления в виде структуры дерева И / ИЛИ для комбинаторного множества стан-

дартных таблиц Юнга были разработаны следующие алгоритмы комбинаторной генерации:

```

RankVariant( $v = (v_1, v_2, \dots), n$ )
begin
  if  $n = 0$  or  $n = 1$  then  $r := 0$ 
  else
    if  $v_1 = 0$  then  $r := \text{RankVariant}(v = (v_2, \dots), n - 1)$ 
    else
       $l_1 := v_1 - 1$ 
       $l_2 := \text{RankVariant}(v = (v_2, \dots), n - 2)$ 
       $r := l_1 + (n - 1) \cdot l_2 + A(n - 1)$ 
    end
  end
  return  $r$ 
end

UnrankVariant( $r, n$ )
begin
  if  $n = 0$  or  $n = 1$  then  $v := ()$ 
  else
    if  $n = 0$  then  $v := (0)$ 
    else
      if  $r < A(n - 1)$ 
      then  $v := \text{concat}((0), \text{UnrankVariant}(r, n - 1))$ 
      else
         $r := r - A(n - 1)$ 
         $l_1 := r \bmod (n - 1)$ 
         $l_2 := \text{floor}(r / (n - 1))$ 
         $v := \text{concat}((l_1 + 1), \text{UnrankVariant}(l_2, n - 2))$ 
      end
    end
  end
  return  $v$ 
end

```

Алгоритм ранжирования  $\text{RankVariant}(v, n)$  для заданного варианта  $v$  дерева И / ИЛИ, с помощью которого представлена некоторая стандартная таблица Юнга размера  $n$ , вычисляет соответствующий ей ранг  $r$ . Алгоритм  $\text{UnrankVariant}(r, n)$  выполняет обратные преобразования, т.е. по заданному рангу  $r$  выполняется восстановление исходного варианта  $v$  дерева И / ИЛИ.

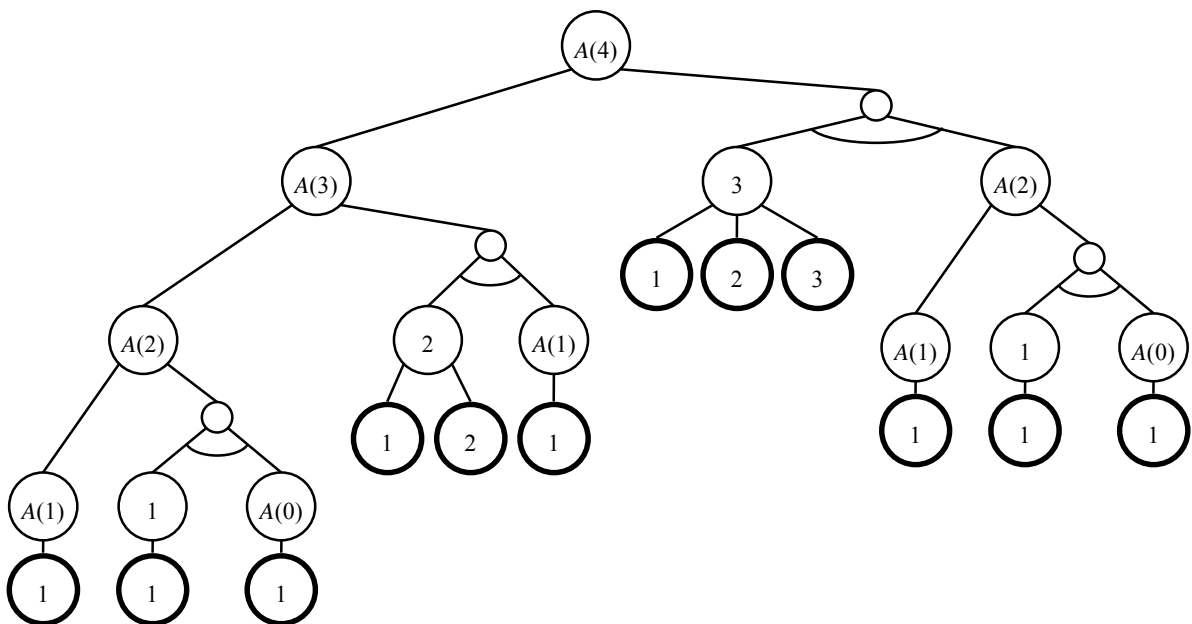


Рис. 1. Пример структуры дерева И / ИЛИ для  $A(4)$

Таблица 1

**Пример сопоставления вариантов дерева И / ИЛИ для A(4) и стандартных таблиц Юнга размера 4**

Комбинаторный объект	Код варианта дерева И / ИЛИ	Формула построения таблицы Юнга	Таблица Юнга						
$a_1$	$v_1 = (0, 0, 0)$	$\emptyset + (1) + (2) + (3) + (4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4		
1	2	3	4						
$a_2$	$v_2 = (0, 0, 1)$	$\emptyset + (1,2) + (3) + (4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td></td><td></td></tr></table>	1	3	4	2		
1	3	4							
2									
$a_3$	$v_3 = (0, 1)$	$\emptyset + (1) + (1,3) + (4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td></td></tr></table>	1	4	2		3	
1	4								
2									
3									
$a_4$	$v_4 = (0, 2)$	$\emptyset + (1) + (2,3) + (4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td></td><td></td></tr></table>	1	2	4	3		
1	2	4							
3									
$a_5$	$v_5 = (1, 0)$	$\emptyset + (1) + (2) + (1,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td></tr></table>	1	3	2		4	
1	3								
2									
4									
$a_6$	$v_6 = (1, 1)$	$\emptyset + (1,2) + (1,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td></tr><tr><td>2</td></tr><tr><td>3</td></tr><tr><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4		
1									
2									
3									
4									
$a_7$	$v_7 = (2, 0)$	$\emptyset + (1) + (2) + (2,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td></tr></table>	1	2	3		4	
1	2								
3									
4									
$a_8$	$v_8 = (2, 1)$	$\emptyset + (1,2) + (2,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4		
1	2								
3	4								
$a_9$	$v_9 = (3, 1)$	$\emptyset + (1) + (2) + (3,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td></td><td></td></tr></table>	1	2	3	4		
1	2	3							
4									
$a_{10}$	$v_{10} = (3, 2)$	$\emptyset + (1,2) + (3,4)$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr></table>	1	3	2	4		
1	3								
2	4								

В данных алгоритмах используются следующие математические операции:

- $a \bmod b$ : значение остатка при делении числа  $a$  на число  $b$ ;
- $\text{floor}(a)$ : целая часть числа  $a$ ;
- $\text{concat}(a, b)$ : конкатенация двух последовательностей  $a$  и  $b$ .

Для проверки корректности работы разработанных алгоритмов ранжирования и генерации по рангу была создана программная реализация на языке программирования JavaScript. В табл. 2 представлен пример полученных результатов ранжирования для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга размера 4.

Проведённый вычислительный эксперимент, включающий в себя генерацию по рангу всех элементов рассматриваемого комбинаторного множества и их последующее ранжирование для фиксированных значений параметра  $n$ , подтвердил корректность работы разработанных алгоритмов комбинаторной генерации.

Таблица 2

**Пример ранжирования комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга размера 4**

Комбинаторный объект	Код варианта дерева И / ИЛИ	Ранг
$a_1$	$v_1 = (0, 0, 0)$	$r_1 = 0$
$a_2$	$v_2 = (0, 0, 1)$	$r_2 = 1$
$a_3$	$v_3 = (0, 1)$	$r_3 = 2$
$a_4$	$v_4 = (0, 2)$	$r_4 = 3$
$a_5$	$v_5 = (1, 0)$	$r_5 = 4$
$a_6$	$v_6 = (1, 1)$	$r_6 = 5$
$a_7$	$v_7 = (2, 0)$	$r_7 = 6$
$a_8$	$v_8 = (2, 1)$	$r_8 = 7$
$a_9$	$v_9 = (3, 1)$	$r_9 = 8$
$a_{10}$	$v_{10} = (3, 2)$	$r_{10} = 9$

**Заключение**

Таким образом, совокупность разработанных новых комбинаторных алгоритмов и полученных ранее правил биекции позволяет организовать процесс ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга. В свою очередь, это позволяет организовать эффективную

обработку информационных множеств, представляемых в форме структуры таблиц Юнга.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70037.

#### *Литература*

1. Kreher D.L. Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search / D.L. Kreher, D.R. Stinson. – USA: CRC Press, 1999. – 329 p.

2. Кнут Д.Э. Искусство программирования. – Т. 4, А. Комбинаторные алгоритмы, ч. 1. – М.: Вильямс, 2013. – 960 с.

3. Попова А.Е. Диаграммы Юнга в теории макросистем: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.01. – Воронеж, 2015. – 118 с.

4. Integer partitions and exclusion statistics: Limit shapes and the largest parts of Young diagrams / A. Comtet, S.N. Majumdar, S.Ouvry, S. Sabhapandit // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2007. – Vol. 10. – Article P10001.

5. Okounkov A. Quantum Calabi-Yau and classical crystals / A. Okounkov, N. Reshetikhin, C. Vafa // Progress in Mathematics. – 2006. – Vol. 244. – P. 597–618.

6. Yong A. What is a Young tableau? // Notices of the AMS. – 2007. – Vol. 54, No. 2. – P. 240–241.

7. Number of standard Young tableaux with  $n$  cells [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://oeis.org/A000085>, свободный (дата обращения: 19.09.2021).

8. Shablya Y.V. Method for developing combinatorial generation algorithms based on AND/OR trees and its application / Y.V. Shablya, D.V. Kruchinin, V.V. Kruchinin // Mathematics. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – Article 962.

9. Бобков А.Д. Построение структуры дерева И / ИЛИ и разработка правил биекции для комбинаторного множества таблиц Юнга // Матер. IX регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2020. – С. 184–187.

10. Beissinger J.S. Similar constructions for Young tableaux and involutions, and their application to shiftable tableaux // Discrete Mathematics. – 1987. – Vol. 67, No. 2. – P. 149–163.

---

#### **Шабля Юрий Васильевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа

Эл. почта: [syv@fb.tusur.ru](mailto:syv@fb.tusur.ru)

#### **Бобков Александр Дмитриевич**

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: [alex.bobkov98@mail.ru](mailto:alex.bobkov98@mail.ru)

УДК 621

А.Б. Кураков, А.Б. Гомбоин

## Разработка программного обеспечения обработки изображений движения человека

Современная медицина наблюдает явный прирост заболевших с болезнями опорно-двигательного аппарата. После лечения большинства болезней опорно-двигательного аппарата требуется реабилитация, однако не всегда получается оценить ее прогресс или результат, именно для этого необходимо использовать программно-технические комплексы. Использование цифровой камеры и специального программного обеспечения позволяет достаточно просто и быстро получать качественные данные о походке человека в реальном времени. В данной работе рассматривается процесс разработки программного обеспечения как алгоритмов выделения и анализа фигуры человека, так и разработки интуитивно понятного интерфейса программы.

**Ключевые слова:** изображение, методы обработки, центр масс, походка человека.

Данные недавнего исследования «Глобальное бремя болезней» (ГБВ) свидетельствуют о том, что примерно 1,71 млрд. человек в мире страдают от нарушений и болезней опорно-двигательного аппарата системы [1]. Хотя распространенность болезней опорно-двигательного аппарата различается в зависимости от возраста и диагноза, от них страдают люди любого возраста повсюду в мире. Наиболее сильно затронуто такими болезнями население стран с высоким доходом (441 млн. человек), далее идут жители региона западной части Тихого океана (427 млн. человек) и региона Юго-Восточной Азии (369 миллионов человек). Нарушения и болезни костно-мышечной системы также занимают ведущее место среди факторов инвалидности в мире: на них приходится примерно 149 млн. лет жизни, прожитых с инвалидностью, что в глобальном масштабе составляет 17% всех лет, прожитых с инвалидностью, обусловленной разными причинами.

После лечения большинства болезней опорно-двигательного аппарата требуется реабилитация, но зачастую невозможно получить точные данные о проходящей реабилитации. Поэтому необходимо создавать различные системы диагностики двигательной активности.

Перед нами стояла цель разработать интуитивно понятное и удобное программное обеспечение, которым мог бы пользоваться любой человек. Данную цель можно разделить на две основные задачи: разработка алгоритма выделения движения человека и разработка интерфейса программного обеспечения.

### Разработка алгоритма выделения фигуры человека

Разработка алгоритма выделения движения человека сводится к изучению различных типов походки, съемки видеозаписей и обработки полученных видеозаписей с походкой человека.

Среди всех способов запечатления походки человека, оптический, с помощью цифровых RGB камер подход является наиболее популярным. Этот подход связан с такими этапами: получение изображения, предварительная, тематическая обработка и анализ.

Для получения качественных данных недостаточно иметь просто хорошую цифровую камеру, необходимо учесть все нюансы при использовании

цифровой камеры – одним из основных факторов, влияющих на качество получаемых изображений, является освещение. Свет от ламп не всегда однородный, а если их несколько, то это приведет к тому, что на разных кадрах будет совершенно разное освещение, хотя человеческому глазу эти изменения незаметны.

Для получения достоверных данных необходимо создать определенные условия для минимизации факторов, влияющих на качество получаемой видеозаписи. Для этого необходимо построить определенную сцену.

Рассмотрим основные условия съемки видеозаписи:

- 1) устойчивое и яркое освещение;
- 2) статичный однородный фон;

3) камера должна иметь минимальное разрешение съемки 640×480 пикселей и не менее 30 кадров в секунду;

4) камера должна быть расположена в 3 м от построенной сцены [2].

Для проведения эксперимента была построена сцена с использованием тканевого белого фона и статичной камеры Nikon D3500 с разрешением 1920×1080 пикселей и с частотой 60 кадров в секунду. Построенная сцена приведена на рис. 1.



Рис. 1. Построенная сцена для проведения эксперимента

По построенной сцене проходит человек, он должен проходить перпендикулярно сцене в среднем 4–5 м туда и обратно. На основе этой проходки можно получить достаточно данных, чтобы определить точные параметры походки человека. Пример того, как человек должен идти по сцене, приведен на рис. 2.

Для получения фигуры человека с изображения необходимо провести несколько основных действий, которые были описаны выше. Рассмотрим данные действия более подробно.

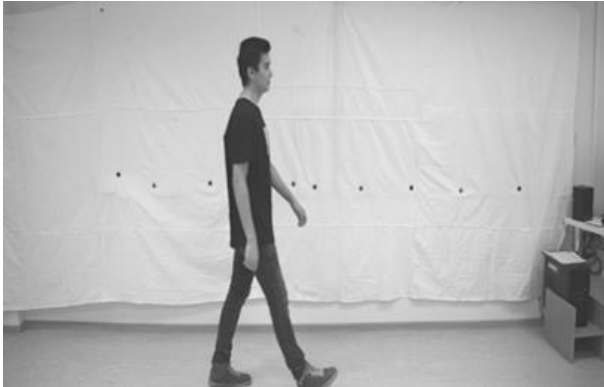


Рис. 2. Движение человека по сцене

Первым этапом происходит коррекция исходного изображения, выравниваются гистограммы, чтобы изменения яркости были незаметны. Для этого применяется технология «Серый мир» [3].

Следующим этапом идет вычитание фона. Это основная часть выделения фигуры человека. Фигуры выделяется на основе вычитания статичного фона по отношению к постоянно движущемуся человеку. Такой подход позволяет достаточно быстро и точно получать фигуры человека на изображении. Для вычитания фона использовался алгоритм MOG2 входящий в библиотеку OpenCV. Смесь гауссовского метода изучает фон в соответствии с историей кадров в видеозаписи, после на основе этой смеси формируется маска нового изображения [4].

После вычитания фона получается бинарное изображение, где белым отображаются динамические объекты. Однако цифровые камеры не совершенны и на изображениях иногда остаются шумы, чтобы их удалить, используются морфологические преобразования, что позволяет более точно определить фигуру, также данные преобразования помогают восстанавливать фигуру человека в случае, если она была выделена неточно [5]. Выделенная фигура представлена на рис. 3.



Рис. 3. Выделенная фигура человека

На основе полученной фигуры по формулам (1) и (2) можно получить центр тяжести фигуры человека, и уже полученные данные об изменении центра тяжести позволяют получать различные параметры походки человека [6].

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (i * M_{i,j})}{Area}, \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (j * M_{i,j})}{Area}. \quad (2)$$

#### Разработка интерфейса программы

Программа содержит 10 окон. Схема разработанной программы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема разработанного ПО

Рассмотрим главное окно, ведь основной функционал представлен именно на нем. На данном окне располагаются: видеозапись с возможностью выбора режима просмотра обработки на разных этапах, графики изменения центра тяжести по координатам, таблица с изменением центра тяжести, панель загрузки сохраненных результатов и панель с различными параметрами. Вверху находятся кнопки управления видеозаписью, изменения пациента, сохранения по-

следнего результата, смены пользователя и настройки пользователя. Главное окно представлено на рис. 5, 6.



Рис. 5. Полное главное окно



Рис. 6. Главное окно с закрытой боковой панелью

### Заключение

В данной работе была рассмотрена разработка программного обеспечения для обработки изображений движения человека. Разработанное ПО на данном этапе является лишь экспериментальным образцом и является основой для дальнейших нововведений. Одна из перспектив развития данного ПО – это

создание полноценного графического протокола со всеми параметрами походки человека. Данная разработка также поддержана фондом содействия инновациям по программе «УМНИК».

### Литература

1. Cieza A., Causey K., Kamenov K., Hanson S.W., Chatterj, S., Vos T. (2020). Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // The Lancet. – 396(10267). – 2006–2017.
2. Кураков А.Б. Разработка информационной системы обработки изображений с целью выделения паттернов движения человека // Молодой ученый. – 2020. – № 21 (311). – С. 11–13. – URL: <https://moluch.ru/archive/311/70746/> (дата обращения: 18.09.2021).
3. Захаров Р.К. Методы повышения качества изображений в задачах распознавания // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/08/16488> (дата обращения: 10.09.2020).
4. How to Use Background Subtraction Methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://docs.opencv.org/3.4/d1/dc5/tutorial\\_background\\_subtraction.html](https://docs.opencv.org/3.4/d1/dc5/tutorial_background_subtraction.html) (дата обращения: 10.09.2020).
5. Кураков А.Б., Хаюмов Б.Р., Волокитин Г.А., Катаев М.Ю. Исследование влияния морфологических преобразований бинарного изображения фигуры человека в задаче контроля параметров походки человека // Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (МНПК ЭСиСУ–2020), Томск, 18–20 ноября 2020 г. – Томск: В-Спектр, 2020.
6. Катаев М.Ю. Выделение паттернов движения на основе центра масс фигуры человека с использованием видеоизображений // М.Ю. Катаев и др. // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 56–61.

### Кураков Андрей Борисович

Студент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа  
Эл. почта: [snipercraft@bk.ru](mailto:snipercraft@bk.ru)

### Гомбоин Александр Булатович

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [a.gomboin@mail.ru](mailto:a.gomboin@mail.ru)

С.М. Алфёров, Р.Е. Богачев, А.С. Бондаренко,  
А.А. Пивоваров, Д.А. Неверовский, С.Ю. Хотненко

## Разработка системы автоматизированного управления отоплением

Представлены результаты промежуточного этапа разработки аппаратно-программной системы автоматизированного управления отоплением. На текущий момент было реализовано считывание показателей датчиков температуры и термопары, программное управление электроникой, а также построена математическая модель объекта управления.

**Ключевые слова:** автоматическая регулировка температуры, отопление, аппаратно-программный комплекс.

Автоматизированное управление отоплением – это система, предназначенная для использования в квартирах, частных домах, коттеджах, предприятиях и любых помещениях, обеспечивающая комфортное проживание и ресурсосбережение. Оно должно уметь распознавать конкретные ситуации (изменение температуры в помещении, резкое похолодание на улице) и соответствующим образом на них реагировать, изменяя температуру в помещении.

Целью данной работы является создание системы автоматизированного управления терморегуляцией помещения.

Для достижения поставленной цели был составлен ряд задач, решение которых позволит создать задуманную систему:

1. Определить структуру системы.
  2. Собрать экспериментальные данные изменения температуры воды и температуры в помещении в зависимости от режима работы установки.
  3. Построить математическую модель изменения температуры воды и температуры в комнате во времени в зависимости от напряжения на нагревательном элементе котла.
  4. Идентифицировать неизвестные параметры математической модели.
  5. Построить модель работы системы управления.
  6. Настроить параметры регулятора.
  7. Определить структуру удаленного управления системой.
  8. Разработать серверную часть.
  9. Разработать клиентскую часть (веб-приложение).
- В рамках данной статьи будут рассмотрены задачи под номером 1–3, 7 и 8, а также текущие результаты, полученные в ходе их решений.

### Структура системы

Для наглядности на рис. 1 представлен рабочий стенд с обозначениями элементов системы. Структура системы управления [1, 2] стенда представлена на рис. 2. Её можно представить в виде трёх составляющих: устройства управления, объекта управления и датчиков.

Устройство управления получает данные с датчиков и затем, после обработки полученной информации, осуществляет воздействие на объект управления.

Устройством управления является контроллер ATmega 168 [3] 7, объектом управления – реле 7,

которое в свою очередь управляет котлом 3, насосом 4 и клапаном 5. Данные мы получаем с термопары и датчиков температуры в помещении и во внешней среде. Это хорошо отражено на рис. 3.



Рис. 1. Рабочий стенд: 1 – термопара (на выход котла); 2 – термопара (на вход котла); 3 – котел; 4 – насос; 5 – клапан; 6 – датчик температуры в помещении; 7 – реле и контроллер; 8 – управляющая ЭВМ

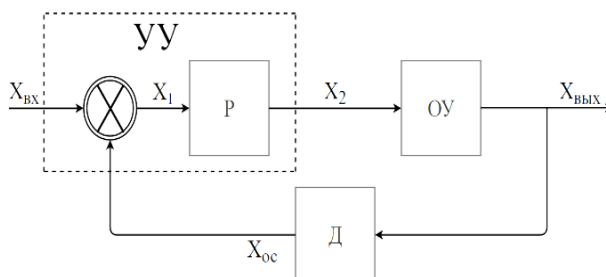


Рис. 2. Структура системы управления: УУ – устройство управления; ОУ – объект управления; Д – датчики; Р – регулятор;  $X_{вх}$  – желаемая температура;  $X_1$  – данные для корректировки;  $X_2$  – управляющий сигнал;  $X_{вых}$  – температура в комнате;  $X_{ос}$  – данные с датчиков

Показатели с каждого датчика считываются контроллером и отправляются на управляющую ЭВМ, которая отвечает за их обработку, анализ и отправку на веб-сервер. Помимо этого, управляющая ЭВМ посредством устройства управления будет управлять элементами системы.

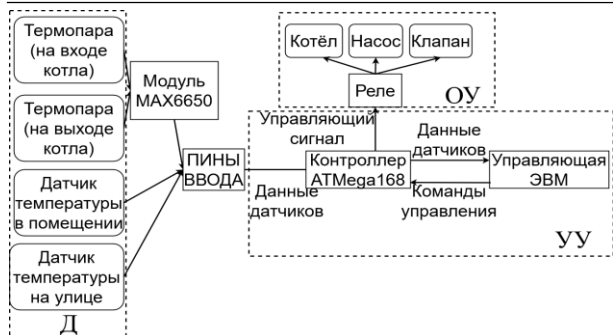


Рис. 3. Структура системы управления, детальный вид

**Сбор экспериментальных данных**

Необходимость в экспериментальных данных присутствует по нескольким причинам:

- проверка элементов системы на работоспособность и соответствие заявленным характеристикам и ограничениям;
- проверка работы написанного программного обеспечения для получения данных и управления установкой;
- получение сведений о поведении системы при различных вариантах работы необходимо для построения математической модели и определения её неизвестных.

В результате данные были собраны и визуализированы в виде:

- графика изменения температур при работе котла на полную мощность, при этом вода течет в обход радиатора через шунт, представленный на рис. 4;
- графика изменения температур при работе котла на полную мощность, при этом вода течет через радиатор (рис. 5);

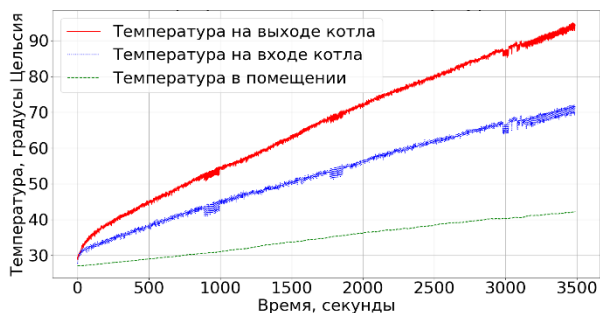


Рис. 4. Изменение температур при работе котла на полную мощность, вода течет в обход радиатора

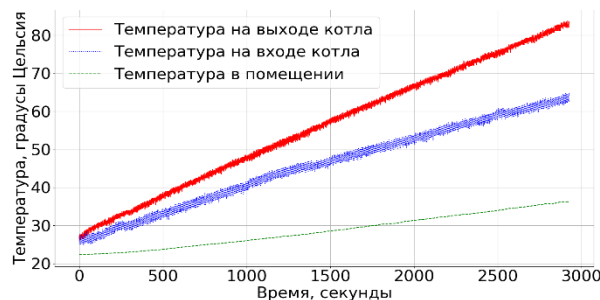


Рис. 5. Изменение температур при работе котла на полную мощность

- графика изменения температур при отключенном котле, проход воды в радиатор закрыт шунтом (рис. 6);

- графика изменения температур при отключенном котле, проход воды в радиатор открыт (рис. 7).

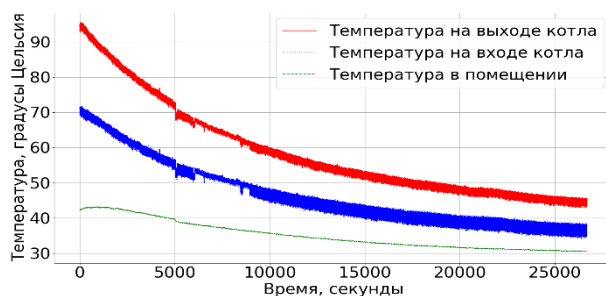


Рис. 6. Изменение температур при отключенном котле, проход в радиатор закрыт шунтом

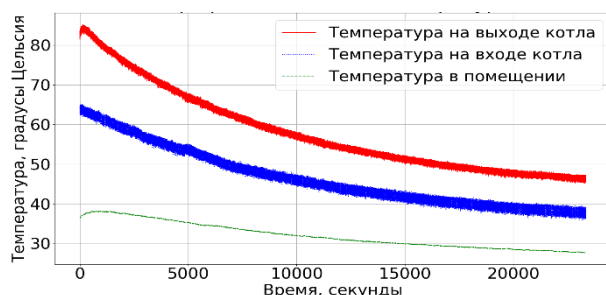


Рис. 7. Изменение температур при отключенном котле, проход в радиатор открыт

**Моделирование изменения температуры воды и температуры в комнате во времени**

Математическая модель – приближенное описание объекта моделирования, выраженное с помощью математической символики. Модель нужна для того, чтобы научиться управлять объектом (или процессом) и определить наилучшие способы управления при заданных целях и критериях (управление), а также прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на объект (прогнозирование).

В нашем случае объектом управления является нагревательный элемент котла, воздействие на который происходит посредством изменения напряжения на нём. Это отражено на рис. 8. Как видно на данном рисунке, изменение напряжения возможно благодаря реле, которое косвенно через УУ контролируется управляющей ЭВМ.

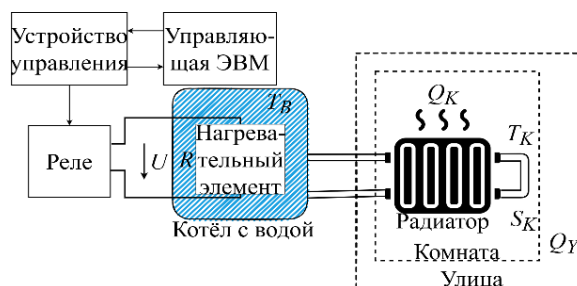


Рис. 8. Объект управления математической модели:

- $U$  – напряжение на нагревательном элементе;
- $R$  – сопротивление на нагревательном элементе;
- $T_B$  – температура воды;  $T_K$  – температура помещения;
- $Q_K$  – кол-во теплоты, поступающее в помещение;
- $Q_Y$  – кол-во теплоты, поступающее во внешнюю среду;
- $S_K$  – площадь соприкосновения помещения с внешней средой



Написанная математическая модель представлена формулой (1).

$$\begin{cases} \dot{T}_B(t) = \frac{U(t)^2}{R \cdot c_B \cdot m_B} - \frac{Q_k(t)}{c_B \cdot m_B}; \\ \dot{T}_k(t) = \frac{Q_k(t) - Q_y(t)}{c_k \cdot m_k}; \\ Q_k(t) = (T_B(t) - T_k(t)) \cdot q_{Bk} \cdot S_p; \\ Q_y(t) = (T_k(t) - T_y(t)) \cdot q_{ky} \cdot S_k; \\ T_B(t) = T_B(t-dt) + \dot{T}_B(t)dt; \\ T_k(t) = T_k(t-dt) + \dot{T}_k(t)dt, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{T}_k(t)$  – скорость роста температуры в помещении от времени;  $Q_k(t)$  – количество теплоты, поступающее в помещение;  $Q_y(t)$  – количество теплоты, поступающее во внешнюю среду;  $q_{vk}$  – теплопроводность от воды в помещение;  $q_{ku}$  – теплопроводность от помещения во внешнюю среду;  $c_k$  – теплоемкость воздуха;  $m_k$  – масса воздуха;  $\dot{T}_B(t)$  – скорость роста температуры воды.

Для компьютерного моделирования, систему уравнений (1) можно представить в матричном виде формулой (2):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & q_{Bk} \cdot S_p & -q_{Bk} \cdot S_p & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -q_{ky} \cdot S_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -dt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -dt \\ -1 & +1 & 0 & 0 & c_k \cdot m_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Q_{k_i} \\ Q_{y_i} \\ T_{k_i} \\ T_{B_i} \\ \dot{T}_{k_i} \\ \dot{T}_{B_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -T_{y_i} \cdot q_{ky} \cdot S_k \\ T_{k_{i-1}} \\ T_{B_{i-1}} \\ 0 \\ \frac{U_i^2}{R} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В математической модели (1) есть параметры, значения которых неизвестны или нет возможности их точно измерить ( $R$ ,  $c_B$ ,  $m_B$ ,  $c_k$ ,  $m_k$ ,  $q_{Bk}$ ,  $S_p$ ,  $q_{ky}$ ,  $S_k$ ).

На рис. 9 представлены графики поведения температуры воды и температуры воздуха в помещении при следующих значениях параметров:  $R = 40$  Ом,  $c_B = 4200$  Дж/(К·кг);  $m_B = 3$  кг;  $c_k = 1007$  Дж/(К·кг);  $m_k = 0,122$  кг;  $q_{Bk} = 24$  Дж/(К·м<sup>2</sup>);  $S_p = 1$  м<sup>2</sup>;  $q_{ky} = 45$  Дж/(К·м<sup>2</sup>);  $S_k = 1,369$  м<sup>2</sup>. Начальные условия (при  $t = 0$ ):  $Q_k(0) = 0$ ;  $Q_y(0) = 0$ ;  $T_k(0) = 24$  °С;  $T_B(0) = 24$  °С;  $T_k(0) = 24$  °С;  $T_B(0) = 24$  °С;  $\dot{T}_k(0) = 0$ ,  $\dot{T}_B(0) = 0$ . Температура внешней среды постоянна  $T_y(t) = 24$  °С.

Имея экспериментальные данные (см. рис. 4–7) о поведении ОУ и используя математическую модель

ОУ (1), (2), можно идентифицировать неизвестные параметры и уточнить неточно измеренные параметры ОУ. Для идентификации обычно используются методы оптимизации, но в крайнем случае можно воспользоваться и методом подбора.

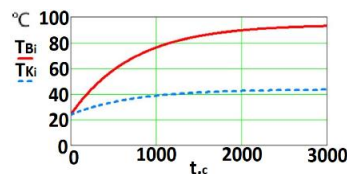


Рис. 9. Теоретический график изменения температуры

### Структура удаленного управления системой

Как было сказано ранее, к установке будет иметься удаленный доступ. Соответственная схема приведена на рис. 10.

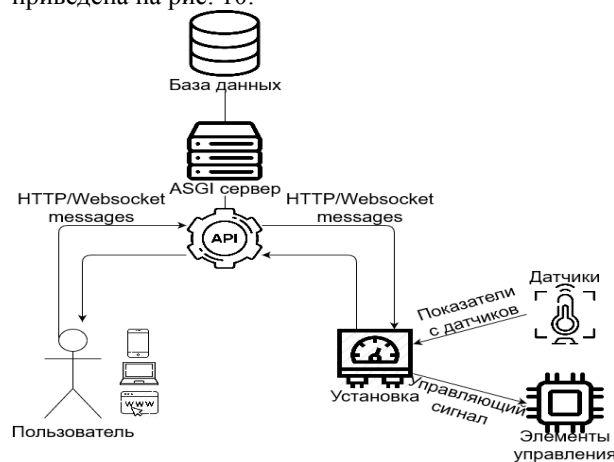


Рис. 10. Схема удаленного доступа к установке

Как видно из данной схемы, взаимодействие между установкой (или же управляющей ЭВМ, поскольку именно она отвечает за отправку данных на веб-сервер и обработку запросов пользователя) и пользователем обеспечивается веб-сервером, который имеет публичный WebAPI, предоставляющий платформу-независимый интерфейс управления и получения данных с установки, что позволит любому разработчику написать необходимое ПО для конкретной платформы.

На текущий момент полностью реализованы пользовательская авторизация и управление, а также ролевая система, позволяющая разграничивать пользователей по привилегиям.

### Разработка серверной части

Для разработки серверной части будет использоваться язык программирования Python с ASGI веб-фреймворком FastAPI. FastAPI, несмотря на то, что появился достаточно недавно, имеет много преимуществ по сравнению с другими Python веб-фреймворками (такими, как Django, Flask и т.д.), среди них можно выделить следующие:

- FastAPI реализован на ASGI и позволяет создавать как асинхронные, так и синхронные приложения;
- FastAPI основан на подсказках типов, что значительно увеличивает читаемость кода, а также упрощает работу с фреймворком;

- FastAPI имеет встроенные OpenAPI (Swagger) и Redoc, позволяющий генерировать автоматическую документацию к коду без надобности в сторонних инструментах.

#### **Заключение**

В ходе выполнения работы было написано необходимое программное обеспечение, была начата разработка серверной части системы.

В результате выполнения работы были получены экспериментальные и теоретические графики изменения температуры, что в итоге поможет идентифицировать параметры объекта управления, а также положено начало разработки средств пользовательского взаимодействия с системой.

В дальнейшем планируется завершение выполнения оставшихся задач.

#### *Литература*

1. Поляков К.Ю. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГМУ, 2012. – 234 с.
2. Кориков А.М. Основы теории управления: учеб. пособие. – 2-е изд. – Томск: НТЛ, 2002. – 392 с.
3. Мейкерство. Arduino и Raspberry Pi. Управление движением, светом и звуком: пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 336 с.

#### **Алфёров Сергей Михайлович**

Канд. техн. наук, доцент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: sergey\_alferow@mail.ru

#### **Богачев Роман Евгеньевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: bogachyov.mail@gmail.com

#### **Бондаренко Алексей Сергеевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: kulek\_leha@mail.ru

#### **Пивоваров Алексей Андреевич**

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: alexey\_1010@mail.ru

#### **Неверовский Данил Андреевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: danil.danil.neverovski.neverov@mail.ru

#### **Хотненко Сергей Юрьевич**

Электроник каф. ПрЭ ТУСУРа  
Эл. почта: khotnenok.i.sergei@tusur.ru

Т.Б. Колкобаев

## Реинжиниринг бизнес-процессов при внедрении ERP-системы. Анализ рисков внедрения ERP-систем на предприятии

Проведен анализ теоретических основ реинжиниринга бизнес-процессов, его основных аспектов, было выполнено знакомство с традиционными методами совершенствования бизнес-процессов. Рассмотрен реинжиниринг бизнес-процессов при внедрении ERP-системы поэтапно. Рассмотрен процесс внедрения ERP-системы в производственную компанию. Выделены и структурированы риски внедрения ERP-системы. Создан реестр рисков внедрения ERP-системы на предприятии ООО «Завод ПСА «ЭлеСи». На основании реестра рисков были выявлены общие факторы и показатели, благодаря которым была сформирована классификация рисков по различным признакам.

**Ключевые слова:** бизнес-процесс, риск, риск-менеджмент, внедрение ERP-систем, реинжиниринг, анализ рисков, эффективность.

С понятием анализа и реорганизацией рабочих процессов тесно связано другое понятие, которое называется реинжиниринг бизнес-процессов (РБП).

РБП является радикальным, иными словами, представляет собой полную деконструкцию и переосмысление бизнес-процесса в целом. Его основная цель – получить количественное преимущество в производительности процесса, представляющее собой следующие аспекты [3, 4–6]:

- время;
- затраты;
- производительность;
- качество;
- оперативность реагирования на запросы клиентов.

Реинжиниринг всегда нацелен на упрощение и оптимизацию процесса путем ликвидации тех избыточных шагов, которые не несут в себе никакой ценности в самом процессе, а также ввиду ускорения самого рабочего процесса за счет использования информационных систем [6].

РБП можно использовать в качестве инструмента для значительного улучшения внутреннего и внешнего качества, тем самым повышая ценность для сотрудников компании, а также для ее партнеров и / или клиентов.

Ключевая концепция, которая лежит в основе реинжиниринга, заключается в том, что он предназначен для замены старого процесса совершенно новым с целью достижения значительного улучшения производительности.

Как правило, сигнальным знаком для реинжиниринга служат две основные проблемы: достаточно низкая скорость выполнения тех процессов, которые повторяются регулярно, и большая трудоемкость. Например, это могут быть процессы ввода и вывода данных компании, их обработка. Но есть ли оптимальные пути решения этих проблем? В современном мире такие проблемы решаются путем автоматизации отдельных подпроцессов одного бизнес-процесса, который необходимо усовершенствовать. В абсолютной любой статье, так или иначе рассматривающей тему реинжиниринга в целом, можно найти упо-

минание об автоматизации организаций. А существуют ли в наше время готовые решения, способные автоматизировать отдельные подпроцессы? Наиболее популярное решение, позволяющее решать такого рода проблемы, – внедрение ERP-системы в компанию [8–10].

Внедрение ERP-системы на предприятии осуществляется для того, чтобы улучшить возможности управления подразделениями.

Система AVA ERP, являясь коробочным продуктом и ERP-системой с упором на производственную сферу, имела серию заложенных функций, отделов и документов. В основе системы функции снабжения, производства, продаж, склада и т.д. Данная ситуация объясняется тем, что внедрение любого процесса в ERP-систему – процесс достаточно творческий и уникальный. Каждая ERP-система имеет свой набор принципов, на которых она основана, и методов управления ресурсами предприятия, которые необходимо учитывать при внедрении элемента. К тому же каждая компания имеет собственный набор особенностей, поэтому при внедрении ERP-системы в работу отдела необходимо учитывать комплекс факторов и рисков, влияющих на последовательность этапов, функциональность, скорость адаптации сотрудников [1].

Для того чтобы процесс внедрения ERP-системы прошел корректно, необходимо пройти определенный ряд этапов (рис. 1). Нужно понимать, что внедрение ERP-системы – это не просто автоматизация некоторых процессов с использованием автоматизированной системы. Внедрение ERP-системы – это в первую очередь реинжиниринг всех процессов компании [2–4, 7].

На первом этапе внедрения системы компании необходимо определить цели, которые она намерена достичь посредством внедрения ERP-системы.

Выбор ERP-системы, способной решить те цели, которые были определены на первом этапе внедрения системы.

Выбранная система должна четко соответствовать требованиям, сформированным руководством компании.

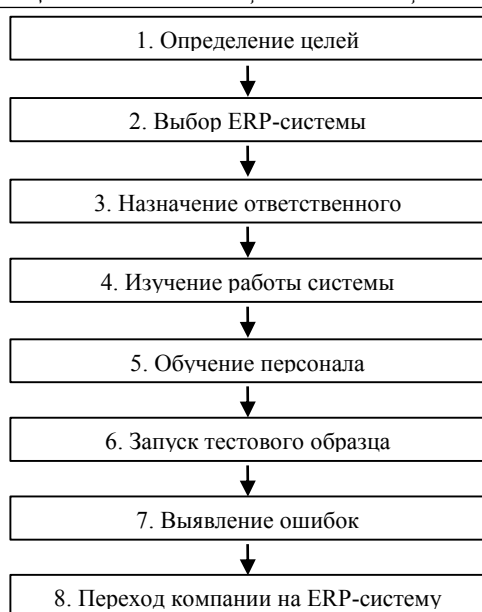


Рис. 1. Этапы внедрения ERP-системы на предприятии

Для эффективного управления компанией в выбранной системе должна быть заложена функция отчетности, что, в свою очередь, необходимо для контроля выполнения бизнес-процессов компании в целом.

Гибкость ERP-системы – один из ключевых аспектов при выборе системы. Поскольку концепция ERP строится на теории ограничений Голдратта, важно понимать, что выбранная система должна легко адаптироваться как к самим бизнес-процессам, так и к любым так называемым «узким местам» в этих процессах.

Следующий этап представляет собой назначение ответственного за внедрение ERP-системы в компании, который знает все бизнес-процессы компании и их «узкие места».

По какому принципу работает система? Какой ее интерфейс? Какие специфические тонкости присущи системе? На все эти вопросы поможет ответить следующий этап, который включает в себя изучение принципов работы выбранной ERP-системы.

Во время перехода на новую для компании систему наступает так называемый период «акклиматизации». Именно это подразумевает под собой следующий этап внедрения ERP-системы – этап обучения персонала.

Следующим шагом для корректного внедрения системы является запуск тестового образца, представляющий собой предварительный запуск системы. Это необходимо для проверки функционирования системы таким образом, как задумывалось ответственными лицами.

Как правило, после того как компания проведет запуск тестового образца, могут быть выявлены некоторые недочеты в работе самой системы, не стоит исключать, что у персонала тоже могут возникнуть вопросы, предложения или даже возражения в работе системы. С учетом вышперечисленного необходимо провести отладку системы. Именно это происходит на следующем этапе – этапе выявления ошибок.

Последним этапом является уже сам переход компании на ERP-систему. Как правило, переход осуществляется последовательно – сначала одной части компании, затем следующей части и т.д.

Внедрение ERP-систем – безусловно, творческий процесс, который имеет свою долю риска [3–5].

Так, например, в табл. 1 приведен реестр рисков внедрения ERP-системы на ООО «Завод ПСА «ЭлеСи».

Таблица 1

Реестр рисков внедрения ERP-системы на ООО «Завод ПСА «ЭлеСи»

Риск	Источник риска	Причина риска	Вероятные последствия	Методы управления риском
Неправильно рассчитанный бюджет проекта	Менеджмент проекта	Низкий уровень менеджмента	Непредвиденные издержки проекта	Регулярный анализ и актуализация бюджета проекта
Возможная нестабильность бизнес-процессов из-за непрекращающихся изменений на предприятии	Процессы перехода на новую систему; испытание системы	Мотивационные решения и поступки (нежелание сотрудников переходить на новый режим)	Потеря стабильной позиции организации, ухудшение руководством и регулированием организацией	Регулярный мониторинг и анализ ключевых показателей и актуальности стратегий предприятия
Возможный дефицит обучающихся компетентных специалистов	Сотрудники организации	Изменение штата фирмы; потеря ключевых кадров	Недостаточный уровень знаний о системе сотрудников и отсутствие компетенций во внедрении ERP-системы	Повышение уровня теоретических знаний сотрудников, поддержание заинтересованности сотрудников в работе

Данные риски можно отнести к трём основным видам:

Программный риск – риск, связанный с недостижением ожидаемых результатов от программной части ERP-системы. Программная часть включает в себя не только интерфейс и удобство использования, но и ожидаемые функции, логистические операции и процессы, учет всех зависимых и подключенных баз данных и т.д.

Кадровый риск – риск, связанный с возможностью возникновения недостатка компетентного потенциала сотрудников, способных не только реализовать внедрение системы, но и провести обучение пользователей системы и осуществлять поддержку данной системы при её непосредственном использовании.

Финансовый риск – риск, связанный с финансовыми несоответствиями: издержки, затраты, прибыль и др.

Исходя из данной таблицы, можно рассмотреть перечень данных рисков для группирования их по некоторым признакам. Первой можно представить классификацию рисков по сферам влияния. Данная классификация представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Классификация рисков по сферам влияния**

Вид риска	Риск
Программный риск	Вероятность недостаточной производительности внедряемой системы
	Нестабильность бизнес-процессов из-за непрекращающихся изменений на предприятии
	Неверно рассчитанная длительность проекта Ввод в эксплуатацию с незамеченными ошибками
Финансовый риск	Неверно рассчитанный бюджет проекта
	Неверно рассчитанная отдача от проекта
Кадровый риск	Возможный дефицит обучающих специалистов
	Нежелание персонала обучаться

Помимо этого, представленные риски можно разделить на риски, имеющие потенциальную угрозу реализоваться в момент процесса внедрения ERP-системы, и риски, имеющие перспективу реализоваться после внедрения системы, т.е. имеющие поствнедренческий эффект. Данный вид классификации представлен в табл. 3.

Таблица 3

**Классификация рисков по периоду возникновения**

Этап	Риск
На этапе внедрения	Неверно рассчитанная длительность проекта
	Неверно рассчитанный бюджет проекта
	Нежелание персонала обучаться
Поствнедренческий этап	Вероятность недостаточной производительности внедряемой системы
	Возможная нестабильность бизнес-процессов из-за непрекращающихся изменений на предприятии
	Ввод в эксплуатацию с незамеченными ошибками
	Неверно рассчитанная отдача от проекта
	Возможный дефицит обучающих специалистов

Проведённый анализ рисков позволит принять меры по их минимизации и будет способствовать достижению цели проекта по внедрению ERP-систем в работу отделов компании ООО «Завод ПСА «ЭлеСи».

**Литература**

1. Panorama Consulting Solutions Research Report, 2016 report on ERP systems and enterprise software. – 2016. – 141 с.
2. Плешкова И.О. Анализ рисков проектов внедрения ERP-систем / И.О. Плешкова, В.О. Кушев // XI Междунар. конф. «Российские регионы в фокусе перемен». Екатеринбург, 17–19 ноября 2016 г.: сб. докл. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. – Ч. 1. – С. 504–519.
3. Процессно-ориентированное внедрение ERP-систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kopetlov.info/publikatsii/protsešno-orientirovannoe-vnedrenie-erp/> (дата обращения: 12.09.2021).
4. Реинжиниринг бизнес-процессов – управление знаниями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sites.google.com/site/upravlenieznaniami/upravlenie-znaniy-i-reinzhiniring-biznesa/reinzhiniring> (дата обращения: 12.09.2021).
5. Внедрение ERP-систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://citforum.ru/seminars/cis99/epr\\_4.shtml](http://citforum.ru/seminars/cis99/epr_4.shtml) (дата обращения: 12.09.2021).
6. Внедрение ERP на предприятии. Этапы процесса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kiborg.net/what\\_is\\_erp\\_project.htm](http://www.kiborg.net/what_is_erp_project.htm) (дата обращения: 18.09.2021).
7. Theory of Constraints. Goldratt Marketing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.toc-goldratt.com/en> (дата обращения: 11.09.2021).
8. Королев Г.В., Баринов В.А. Реинжиниринг бизнес-процессов как инструмент успешного ведения бизнеса // Бюллетень науки и практики. – 2019. – Т. 5, № 12. – С. 281–291.
9. Business Process Reengineering (BPR) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mbaknol.com/modern-management-concepts/business-process-reengineering-bpr/> (дата обращения: 12.09.2021).
10. Яремко П.И. Внедрение ERP-систем как реинжиниринг 2. 0 // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-erp-sistem-kak-reinzhiniring-2-0> (дата обращения: 18.09.2021).

**Колкобаев Темирлан Булатович**

Студент ТУСУРа

Эл. почта: [ktb018@mail.ru](mailto:ktb018@mail.ru)

УДК 681.523.4

В.Т. Тран, А.М. Корилов, Т.Т. Нгуен

## Моделирование гидравлической системы автоматической стабилизации

Разработана модель системы автоматической стабилизации (САС) горизонтальной рабочей плоскости с использованием двух опор гидравлического домкрата. Синтезирован закон скользящего режима управления САС и выполнено моделирование работы САС на программном обеспечении MATLAB SIMULINK. Из результатов моделирования следует, что САС является устойчивой системой и работает достаточно эффективно.

**Ключевые слова:** система автоматической стабилизации, гидравлический домкрат, модель системы, скользящий режим, моделирование системы стабилизации.

Системы автоматической стабилизации (САС) широко используются во многих отраслях науки, техники и промышленности. САС практически применяются на всех транспортных средствах: автомобилях, кораблях, самолетах и т.п. На этих транспортных средствах всегда имеется различное рабочее оборудование, которое необходимо защитить от вибраций транспорта и шумов. САС вполне успешно решают подобные задачи. Особый интерес для исследования представляют гидравлические САС. Гидравлические САС обладают следующими достоинствами [1, 2]: компактная конструкция, высокая производительность, быстрая реакция, надежная работа в сочетании со скользящим контроллером с широким диапазоном регулирования, высокой помехоустойчивостью, управляющий сигнал рассчитывается точно [3, 4]. В данной статье разрабатывается модель САС горизонтальной рабочей плоскости с использованием двух опор гидравлического домкрата, синтезируется закон скользящего режима управления САС и моделируется работа САС в программной среде MATLAB SIMULINK [5].

### Модель САС с двумя электрогидравлическими домкратами

Модель САС представлена на рис. 1, где плоскость  $OAB$  – рабочая плоскость (плоскость, на которой следует разместить рабочее оборудование). Каждая сторона прямоугольной плоскости имеет длину  $a$  и  $b$  соответственно (см. рис. 1). Точка  $O$  на рабочей плоскости является началом координатной системы  $Oxyz$ . Плоскость  $O'A'B'$  – поверхность пола движущегося транспортного средства (например, плоскость пола автомобиля). Начальное расстояние между плоскостью пола автомобиля и рабочей плоскостью равно  $h$ .

Рабочая плоскость соединяется с плоскостью пола транспортного средства в точках  $O, A, B$  через вертикальную стойку  $OO'$  и две опоры гидравлического домкрата  $AA'$  и  $BB'$  (2 опоры гидравлического домкрата имеют начальные длины  $l_1, l_2$ ). Плоскость  $OAB$  может вращаться вокруг осей  $Ox$  и  $Oy$ , но не может вращаться вокруг оси  $Oz$ , муфты  $A, B, A', B'$  представляют собой шаровые соединения, которые могут свободно вращаться вокруг осей  $Ox, Oy, Oz$ .

В системе координат  $Oxyz$  оси  $Ox$  и  $Oy$  параллельны полу, а ось  $Oz$  перпендикулярна полу.

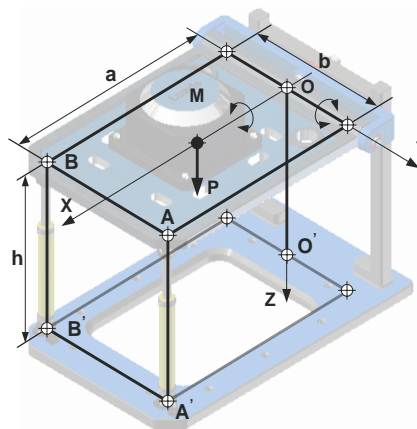


Рис. 1. Построение модели устойчивой балансировочной системы с двумя электрогидравлическими домкратами

Модель работает по принципу изменения длины ножек гидравлического домкрата  $l_1, l_2$  таким образом, чтобы плоскость  $OAB$  вращалась вокруг осей  $Oy$  и  $Ox$ . Пусть  $\theta_1, \theta_2$  – углы поворота плоскости  $OAB$  вокруг оси  $Oy$  и  $Ox$  соответственно в системе координат  $Oxyz$ , мы имеем следующую матрицу преобразования [6]:

$$\mathbf{R}_Y(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_X(\theta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ 0 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_Y(\theta_1)$  – матрица преобразования при повороте плоскости  $OAB$  вокруг оси  $Oy$  на угол  $\theta_1$ .  $\mathbf{R}_X(\theta_2)$  – матрица преобразования при повороте плоскости  $OAB$  вокруг оси  $Ox$  на угол  $\theta_2$ .

Пусть  $\mathbf{R}$  – матрица преобразования при повороте  $OAB$  вокруг оси  $Oy$  и  $Ox$  на соответствующие углы  $\theta_1, \theta_2$ , тогда

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_X(\theta_2)\mathbf{R}_Y(\theta_1). \quad (3)$$

Подставляя (1), (2) в (3), получаем

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Пусть  $A_1, B_1$  – соответствующие координаты  $A$  и  $B$  после поворота плоскости  $OAB$  вокруг оси  $Oy$  и  $Ox$ , соответствующие углы равны  $\theta_1, \theta_2$ , тогда

$$A_1 = \mathbf{R}\mathbf{A}; \quad B_1 = \mathbf{R}\mathbf{B}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Комбинируя (4), (5) и (6), получаем

$$A_1 = \begin{bmatrix} a \cos \theta_1 \\ \frac{b}{2} \cos \theta_2 + a \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ a \cos \theta_2 \sin \theta_1 - \frac{b}{2} \sin \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} a \cos \theta_1 \\ a \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \frac{b}{2} \cos \theta_2 \\ a \cos \theta_2 \sin \theta_1 + \frac{b}{2} \sin \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

После поворота плоскости  $OAB$  углы  $\theta_1, \theta_2$  теперь равны длине опор гидравлического домкрата соответственно:

$$\ell_1 = A_1 A_1'; \quad \ell_2 = B_1 B_1'. \quad (9)$$

С другой стороны:

$$A' = \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \end{bmatrix}; \quad B' = \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Комбинируя (7)–(10), получаем

$$\left\{ \begin{aligned} \ell_1^2 &= (a - a \cos \theta_1)^2 + \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{2} \cos \theta_2 - a \sin \theta_1 \sin \theta_2\right)^2 + \\ &+ \left(h - a \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{b}{2} \sin \theta_2\right)^2; \\ \ell_2^2 &= (a - a \cos \theta_1)^2 + \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{2} \cos \theta_2 + a \sin \theta_1 \sin \theta_2\right)^2 + \\ &+ \left(h - a \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{b}{2} \sin \theta_2\right)^2. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Таким образом, для поворота плоскости  $OAB$  на соответствующие углы  $\theta_1, \theta_2$  вокруг осей  $Oy$  и  $Ox$  длина опоры гидравлического домкрата  $\ell_1, \ell_2$  определяется согласно системе уравнений (11).

#### Модель гидравлического домкрата с сервоклапаном

Модель гидравлического домкрата и её параметры представлены на рис. 2 [7] со следующими параметрами:  $m$  – движущаяся масса;  $F_1$  – площадь поршня;  $P_1$  – перепад давления в 2 камерах цилиндра;  $K_A$  – коэффициент усиления усилителя;  $K_V$  – коэффициент усиления клапана;  $K_C$  – коэффициент усиления обратной связи;  $I$  – управляющий ток сервоклапана;  $u(t)$  – напряжение сигнала управления;  $y$  – расстояние

перемещения объекта,  $m$ ;  $K_0$  – коэффициент слива масла сервоклапана;  $C$  – жесткость пружины;  $\lambda$  – коэффициент потерь потока;  $V$  – объем масла в гидравлической камере;  $B$  – модуль упругости масла;  $f$  – коэффициент вязкого трения масла.

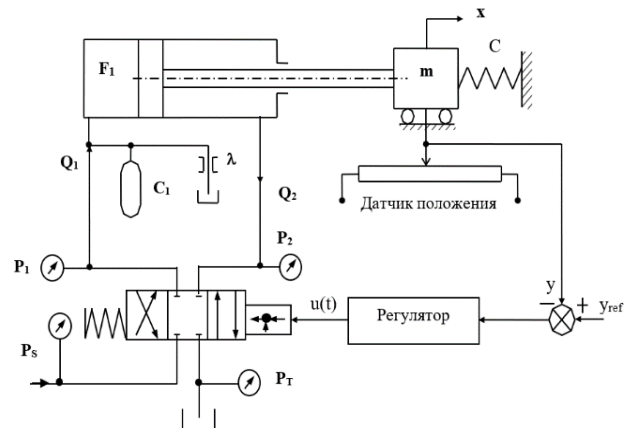


Рис. 2. Модель гидравлического домкрата с сервоклапаном

#### Синтез скользящего режима управления для модели гидравлического домкрата возвратно-поступательного движения

Рассмотрим САС с точки зрения вертикального движения массы  $m$  с учетом влияния силы тяжести  $P = m \cdot g$ . Пусть  $P_0$  – начальное давление, когда система находится в состоянии покоя, тогда имеем следующую систему уравнений [7]:

$$\left\{ \begin{aligned} K_V I - K_0 P_1 &= F_1 \frac{dy}{dt} + \frac{V}{2B} \frac{P_1}{dt} + \lambda P_1, \\ F_1 P_1 &= m \frac{d^2 y}{dt^2} + C y + f \frac{dy}{dt} + m g. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Определим переменные состояния САС [8, 9]:

$$x_1 = y; \quad x_2 = \frac{dy}{dt}; \quad x_3 = P_1.$$

Тогда система уравнений (12) переписывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -g - \frac{C}{m} x_1 - \frac{f}{m} x_2 + \frac{F_1}{m} x_3 + dt, \\ \dot{x}_3 &= \frac{2BK_V I}{V} - \frac{2F_1 B}{V} x_2 - \left( \frac{2BK_0}{V} + \frac{2B\lambda}{V} \right) x_3. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Задача состоит в том, чтобы определить управляющий сигнал  $u(t) = K_d I$  так, чтобы выходной сигнал  $y(t)$  соответствовал установленному сигналу  $y_{ref}(t)$ . Уравнение поверхности скольжения имеет следующий вид [5, 8, 10]:

$$S(e) = k_3 e + k_2 \dot{e} + k_1 \ddot{e} + \ddot{e}, \quad (14)$$

где  $e = x_1 - y_{ref}$ ,  $k_1, k_2, k_3$  – константы, выбранные таким образом, что характеристический многочлен уравнения  $S(e) = 0$  удовлетворяет критерию устойчивости Гурвица [5, 8, 11].

Итак:

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_2 = \frac{2BK_v F_1 I}{mV} + \frac{g \cdot f}{m} - \frac{f}{m} dt + \frac{Cf}{m^2} x_1 + \left( \frac{f^2}{m^2} - \frac{2F_1^2 B}{mV} - \frac{C}{m} \right) x_2 - \left( \frac{2BK_0 F_1}{mV} + \frac{F_1 f}{m^2} + \frac{2B\lambda F_1}{mV} \right) x_3. \quad (15)$$

Из (13), (14) и (15) имеем

$$S(e) = bu + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4, \quad (16)$$

где

$$b = \frac{2BK_v F_1 I}{K_A mV}; \quad a_1 = \frac{Cf}{m^2} + k_3 - \frac{Ck_1}{m};$$

$$a_2 = \frac{f^2}{m^2} - \frac{2F_1^2 B}{mV} - \frac{C}{m} - \frac{k_1 f}{m} + k_2;$$

$$a_3 = \frac{k_1 F_1}{m} - \frac{2BK_0 F_1}{mV} - \frac{F_1 f}{m^2} - \frac{2B\lambda F_1}{mV};$$

$$a_4 = \frac{g \cdot f}{m} - k_1 g - k_3 y_{ref} - \frac{f}{m} dt + k_1 dt;$$

$$\dot{S}(e) = b\dot{u} + b\dot{u} + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 - a_2(g - dt), \quad (17)$$

где

$$b_1 = \frac{2a_3 BK_v}{K_A V}; \quad c_1 = -\frac{a_2 C}{m}; \quad c_2 = a_1 - \frac{a_2 f}{m} - \frac{2a_3 F_1 B}{V};$$

$$c_3 = \frac{a_2 F_1}{m} - \frac{2a_3 BK_0}{V} - \frac{2a_3 B\lambda}{V}.$$

Для ошибки  $e \rightarrow 0$  ( $y \rightarrow y_{ref}$ ) тогда  $\dot{S} \cdot S < 0$ .

Или  $\dot{S}$  имеет знак, противоположный  $S$  [8, 11, 12]:

$$\dot{S} = -K \cdot \text{sign}(S). \quad (18)$$

Из (17) и (18) имеем

$$b\dot{u} + b\dot{u} + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 - a_2 g = -K \text{sign}(S),$$

$$\dot{u} = -\frac{1}{b} ((b\dot{u} + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 - a_2 g) + K \text{sign}(S)). \quad (19)$$

#### Моделирование и оценка результатов

Вычислительными и экспериментальными методами мы строим таблицу параметров моделирования: движущаяся масса  $m = 500$  кг; площадь поршня  $F_1 = 31,2$  см<sup>2</sup>; коэффициент усиления усилителя  $K_A = 500$ ; коэффициент усиления клапана  $K_V = 10$ ; коэффициент усиления обратной связи  $K_C = 5$ ; коэффициент слива масла сервоклапана  $K_0 = 2,58 \cdot 10^{-12}$  (м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>Па<sup>-1</sup>); жесткость пружины  $C = 0,1$  нм<sup>-1</sup>; коэффициент потерь потока  $\lambda = 5 \cdot 10^{-3}$ ; объем масляной камеры  $V = 652,8$  см<sup>3</sup>; модуль упругости масла  $B = 0,1$ ; коэффициент вязкого трения масла  $f = 588$  (нсм<sup>-1</sup>).

#### Моделирование опор гидроцилиндров возвратно-поступательного движения с помощью сервоклапанов

Из уравнения поверхности скольжения (16) и уравнения управляющего напряжения (19) мы моделируем в программном обеспечении MATLAB SIMULINK [5] с коэффициентами  $k_1 = 25$ ,  $k_2 = 300$ ,  $k_3 = 1000$ ,  $K = 100[S]$ . Начальное положение объекта с массой  $m$  равно 15 см.

Из рис. 3–5 мы видим, что система быстро сходится в интервале от 1,5 до 2 с.

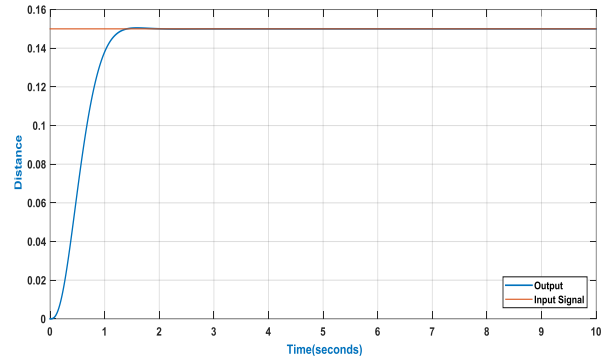


Рис. 3. Реакция САС на положение объекта при использовании динамического скользящего регулятора

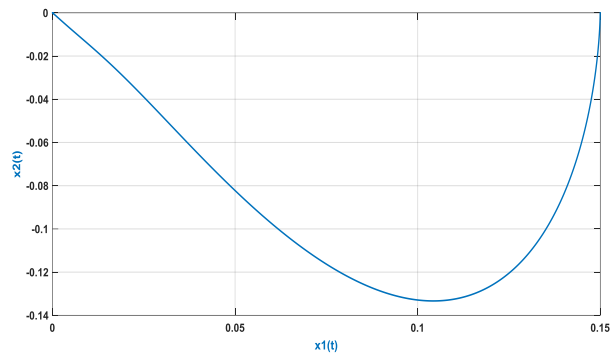


Рис. 4. Реакция САС на  $x_1(t) \rightarrow 0$ ,  $x_2(t) \rightarrow 0$ ,  $S(x_1, x_2) \rightarrow 0$  при использовании динамического скользящего регулятора

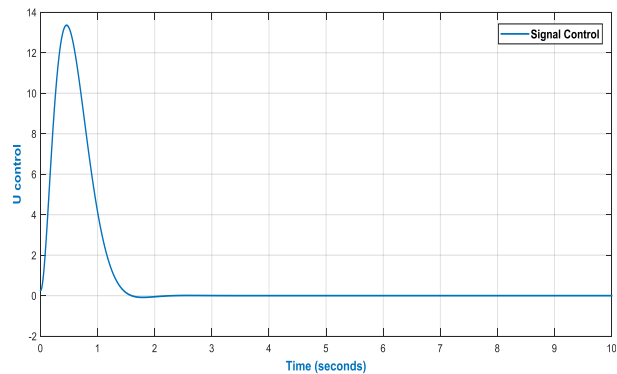


Рис. 5. Реакция САС на управляющий сигнал при использовании динамического скользящего регулятора

Из рис. 4 следует, что скорость сходимости стабильна и менее изменчива в точке равновесия (0,0). Рисунок 5 показывает нам, что управляющий сигнал стабилен и менее подвержен колебаниям.

#### Моделирование работы автоматической системы стабилизации горизонтальной плоскости с помощью 2 опор гидравлического домкрата

На основе уравнений (11), уравнений (16) и (19) моделируется операция стабилизации горизонтальной плоскости САС с использованием двух гидравлических опор с параметрами модели: длина рабочей плоскости  $a = 93,6$  см; ширина рабочей плоскости  $b = 62,5$  см; высота  $h = 72,268$  см.

При входном сигнале угол наклона  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  равен  $\theta_1 = 10^\circ$  и  $\theta_2 = 15^\circ$  соответственно. Из рис. 6–9 мы видим, что система быстро стабилизируется за период от 1,5 до 2 с.



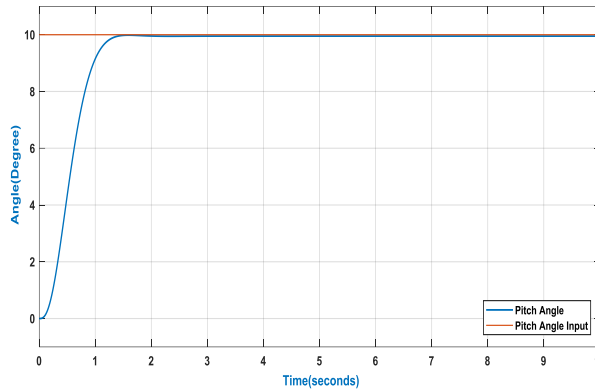


Рис. 6. Реакция САС по углу тангажа при входном сигнале  $\theta_1 = 10^\circ$

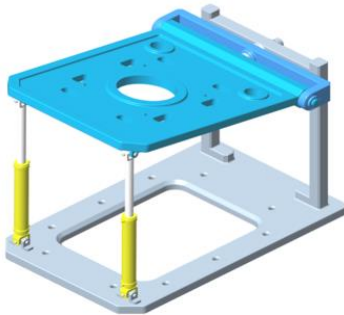


Рис. 7. Реакция САС по углу тангажа при входном сигнале  $\theta_1 = 10^\circ$

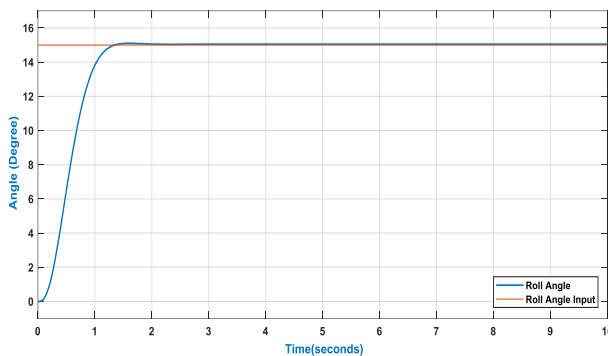


Рис. 8. Реакция САС по углу крена при входном сигнале  $\theta_2 = 15^\circ$

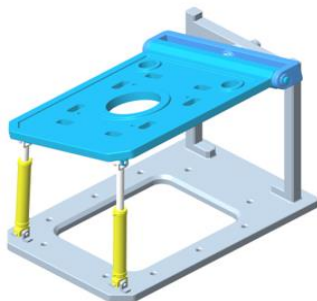


Рис. 9. Реакция САС по углу крена при входном сигнале  $\theta_2 = 15^\circ$

### Заключение

Построена модель системы автоматической балансировки горизонтальной плоскости с использова-

нием двух опор гидравлического домкрата, синтезирован закон скользящего режима управления и выполнено моделирование работы САС в программной среде MATLAB. Результаты моделирования в среде MATLAB показывают, что система достаточно быстро стабилизируется в течение 1,5–2 с. Выходной сигнал стабилен и слабо подвержен влиянию шумов.

### Литература

1. Хохлов В.А. Электрогидравлические следящие системы / В.А. Хохлов, В.Н. Прокофьев, Н.А. Борисова, В.И. Гусаков, В.М. Чуркин. – М.: Машиностроение, 1971.
2. Bessa W.M. Slidingmode control with adaptive fuzzy dead-zone compensation of an electro-hydraulic servo-system / W.M. Bessa, M.S. Dutra, E. Kreuzer // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2010. – Vol. 58, No. 1. – P. 3–16.
3. Bartolini G. Modern Sliding Mode Control Theory: New Perspectives and Applications / G. Bartolini, L. Fridman, A. Pisano, E. Usai. – Berlin: Heidelberg: Springer, 2008. – 468 p.
4. Liu J. Sliding Mode Control Methodology in the Applications of Industrial Power Systems / J. Liu, Y. Gao, Y. Yin, J. Wang, W. Luo, G. Sun. – Springer Nature Switzerland. – 2020. – 205 p.
5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 832 с.
6. Zhou Z. Mimo fuzzy sliding mode control for three-axis inertially stabilized platform / Z. Zhou, B. Zhang, D. Mao // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 7. – P. 1658.
7. Trần Xuân Tuyền. Nghiên cứu động học hệ thống tự động thủy lực chuyển động tịnh tiến chịu tải trọng thay đổi tuyến tính / Trần Xuân Tuyền, Trần Đình Sơn // Tạp chí trường đại học bách khoa Đà Nẵng. – 2010. – Т. 1. – Tr. 24.
8. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
9. Qian D. Hierarchical sliding mode control for a class of mimo under-actuated systems / D. Qian, J. Yi, D. Zhao // Control and cybernetics. – 2008. – Vol. 37, No. 1. – P. 159.
10. Almutairi N.B. On the sliding mode control of a ball on a beam system / N.B. Almutairi, M. Zribi // Nonlinear dynamics. – 2010. – Vol. 59, No. 1. – P. 221–238.
11. Кориков А.М. Основы теории управления: учеб. пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 392 с.
12. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. – М.: Наука, 1973. – 584 с.

### Тран Ван Трук

Аспирант каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: att82glass@gmail.com

### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф. каф. АСУ ТУСУРа,  
вед. н.с. Томского ф-ла  
Федерального исследовательского центра  
информационных и вычислительных технологий СО РАН  
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

### Нгуен Тхань Тьен

Д-р, доцент Технического университета «Ле Куи Дон»  
и Института военной механики, Ханой, Вьетнам  
Эл. почта: ngttienktd@gmail.com

УДК 681.5

А.В. Крайнов, Т.В. Ганджа

## Разработка системы противопожарной сигнализации на базе программируемого логического контроллера с передачей данных по GSM-каналу

Представлены результаты разработки системы противопожарной безопасности на базе программируемого логического контроллера с передачей данных по GSM-каналу. Система разработана для технологического процесса в целях постоянного мониторинга за термокамерами, где протекают сложные технологические процессы под воздействием высоких температур от 40 до 80 °С.

**Ключевые слова:** программируемый логический контроллер, система противопожарной сигнализации, температура, GSM, Structured text.

В современном обществе огромное внимание уделяется созданию систем пожарной безопасности объектов, которые предназначены для защиты жизни людей и материальных ценностей от огня.

Под системой пожарной сигнализации следует понимать целый комплекс технических устройств, которые способствуют своевременному обнаружению, обработке и передаче поступившего сигнала о начале возгорания. Однако обработка информации о состоянии извещателей и управление оповещателя и исполнительными устройствами осуществляются с помощью приёмно-контрольных приборов. При этом сброс тревоги, снятие с охраны и постановка на охрану извещателей выполняются «блоком индикации с клавиатурой (БКИ)». Такое управление усложняет работу оператора ввиду отсутствия наглядного представления о происходящих событиях в системах пожарной сигнализации [1].

Для интеграции подсистем пожарной сигнализации на программном уровне и повышения эффективности оперативного контроля над объектами разработка автоматизированной системы пожарной сигнализацией на базе программируемого логического контроллера является актуальной задачей, позволяющей гибко изменять логику программирования и вместе с тем универсально масштабировать и модернизировать систему пожарной сигнализации, способную выявить пожар на начальной стадии возгорания, оповестить сотрудников и передать сигнал тревоги на пульт охраны.

### Разработка системы

Система пожарной сигнализации представляет собой программно-технический комплекс, который осуществляет мониторинг за температурой в реальном времени для технологических объектов, а именно термокамер. Управляющим устройством в данной системе является программируемый логический контроллер (ПЛК), который принимает аналоговые и дискретные сигналы [2].

Система противопожарной сигнализации на базе ПЛК предназначена для:

- сбора и обработки оперативной информации с датчиков о параметрах работы оборудования в режиме реального времени и выдачи управляющих воздействий на исполнительные устройства;

- мониторинга в режиме реального времени о состоянии объектов «термокамер»;

- раннего обнаружения пожара и управления оповещениями для сотрудников;

- обеспечения сотрудников охранной службы информацией для своевременного принятия эффективных мер управления системами безопасности;

- удалённого информирования сотрудников поста охраны о возникновении пожара;

- исключения человеческого фактора при передаче информации о возникновении чрезвычайных ситуаций на пульт охранной службы;

- возможности реализации мероприятий по совершенствованию комплексной защиты объектов «термокамер».

В соответствии с поставленными выше требованиями разработана структурная схема системы противопожарной сигнализации. Она имеет вид, представленный на рис. 1.

В качестве управляющего устройства был выбран программируемый логический контроллер «Элсима-M01-24P», так как он обладает высоким качеством при относительно небольшой цене. Он используется, в частности, в малых системах автоматизации. Условия эксплуатации и возможность использования ряда протоколов передачи данных с поддержкой интерфейсов являются тоже его преимуществами.

Для отображения информации и взаимодействия сотрудника с системой противопожарной сигнализации была выбрана панель оператора «Элсима VS01-24», предназначенная для управления контроллером «Элсима-M01-24P». Она используется в малых, средних системах автоматизации и локальной автоматике.

Для питания ПЛК и панели оператора был выбран источник питания «EF A 1AC/24 DC-1». Он обладает хорошими энергосберегающими параметрами, а также устойчив к внешним помехам.

В качестве устройства оповещения пожарной тревоги был выбран светозвуковой оповещатель «МАЯК-24-КП». Оповещатель является комбинированным устройством, который включает в себя и световое, и звуковое оповещение.

В качестве измерительного прибора был выбран датчик термосопротивления «ТС054». Его принцип действия основывается на зависимости электрического сопротивления от температуры.

При срабатывании пожарной тревоги отключенные светозвукового оповещателя происходит при

нажатии релейной кнопки сброса «800E-3X10». Она имеет релейный принцип построения. Изделие состоит из двух узлов – быстросъемной головки и контактного модуля.

#### Прикладное программное обеспечение

Прикладное программное обеспечение для ПЛК «Элсима» было создано в среде разработки Codesys 3.5 на одном из языков стандарта МЭК 61131-3. ST (Structured text) – это одна из составных частей комплекса CoDeSyS и представляет собой текстовый язык высокого уровня, похожий на Pascal. Преимуществом языка является создание сложных математических и разветвленных алгоритмов. ST позволяет без труда описывать сложные операции компактным и лёгким для восприятия текстом. Structured Text содержит в себе много конструкций, позволяющих присваивать переменные, использовать готовые библиотеки, функции и функциональные блоки [3].

Основной алгоритм работы системы противопожарной сигнализации на базе ПЛК представлен на рис. 2.

Все полученные данные с датчиков термосопротивления, а именно температура в реальном времени, транслируются на панель оператора, подключенную по LAN-соединению. Панель оператора служит инструментом настройки данной системы и позволяет выполнять следующие функции:

- задавать уставку температуры срабатывания системы противопожарной сигнализации;
- менять номера абонентов получения SMS-оповещения;
- отображать данные с датчиков температур всех термокамер;

- отображать выставленную уставку;
- отображать статус сирены «Работает» или «Отключена»;
- отображать статус работы GSM-модуля;
- отображать статус соединения между двумя контроллерами (связь Master).

Разработанный интерфейс панели оператора представлен на рис. 3.

Для работы с панелью оператора была применена библиотека ElsyHMILibrary, разработанная для инструментального программного комплекса CoDeSyS и позволяющая создавать экземпляры экранов, наполнять экраны статическими и динамическими данными, организовывать соединения с панелью оператора по протоколу HMI.

#### Заключение

Разработана и спроектирована в среде разработки Codesys 3.5 на языке (Structured text) стандарта МЭК 61131-3 система противопожарной сигнализации на базе ПЛК с возможностью передачи данных через GSM-канал, которая позволяет производить мониторинг в режиме реального времени о состоянии объектов «термокамер», обеспечивать сотрудников информацией для своевременного принятия эффективных мер предотвращения чрезвычайных ситуаций, удалённо информировать сотрудников поста охраны о возникновении возгорания через GSM-модуль в виде SMS-сообщения, передавать данные о возникновении чрезвычайных ситуаций на пульт охранной службы, а также имеет возможность реализации мероприятий по совершенствованию комплексной защиты объектов «термокамер».

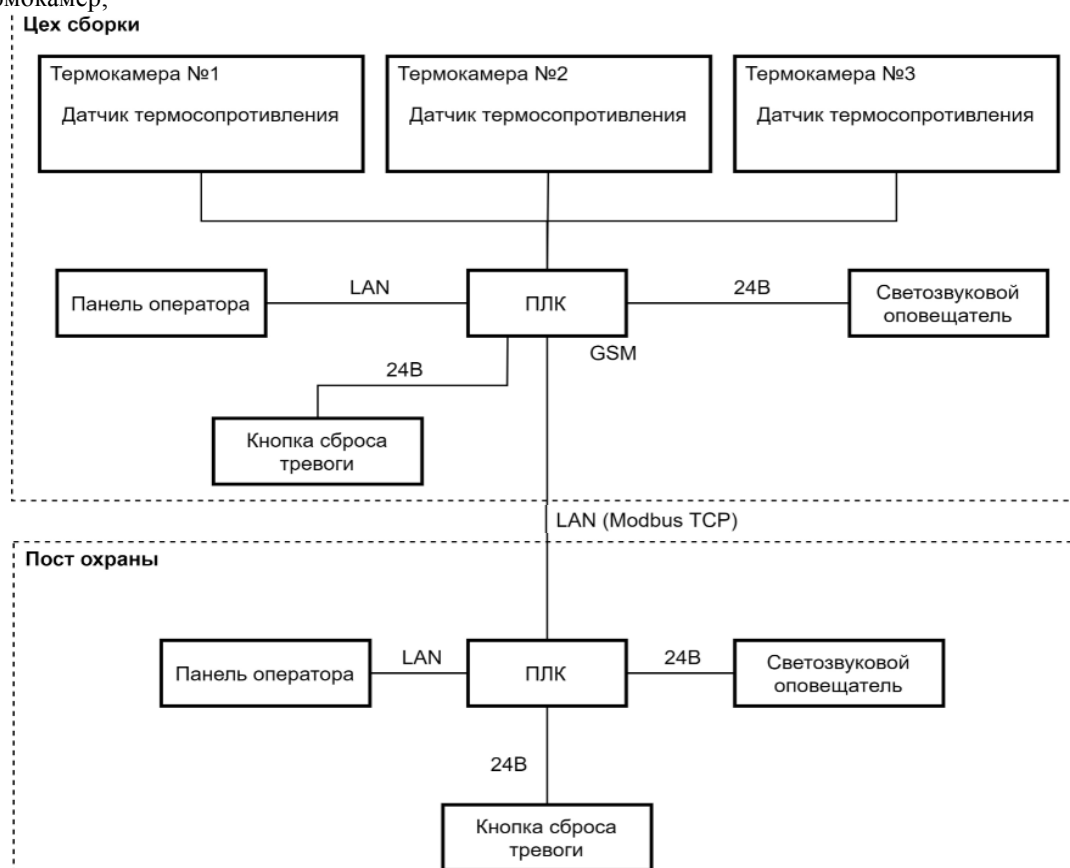


Рис. 1. Структурная схема системы противопожарной сигнализации

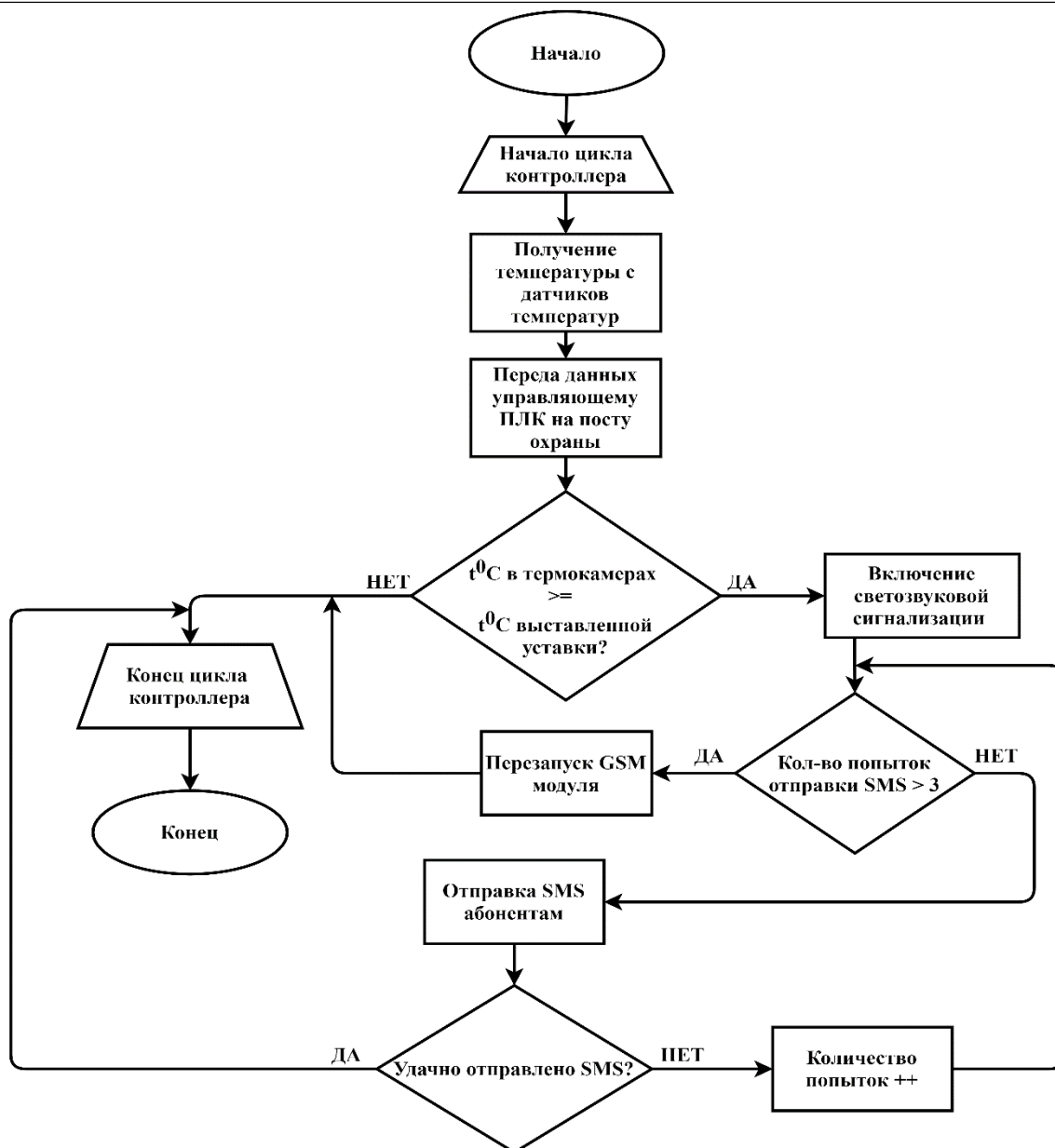


Рис. 2. Схема алгоритма работы программы

Литература

1. Пучков В.А. Пожарная безопасность учеб.: в 2 ч. – Ч. 2 / В.А. Пучков, В.С. Артамонов, Ш.Ш. Дагиров и др.; под общ. ред. В.А. Пучкова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 418 с.
2. Шишов О.В. Современные технологии промышленной автоматизации: учеб. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 273 с.
3. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления (ССУЗ). – М.: КолосС, 2006. – 352 с.

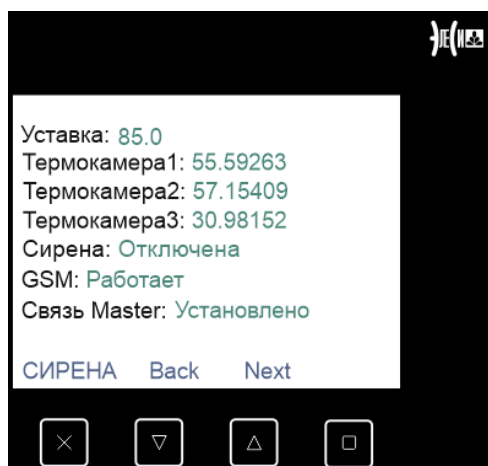


Рис. 3. Интерфейс панели оператора

**Крайнов Александр Валерьевич**  
 Магистрант КСУП ТУСУРа  
 Эл. почта: altezza1@mail.ru

**Ганджа Тарас Викторович**  
 Д-р техн. наук, доцент, проф. каф. КСУП ТУСУРа

И.А. Крючков

## Выделение наиболее эффективных сочетаний каналов при анализе устоявшихся зрительно вызванных потенциалов с помощью индекса многомерной синхронизации

Работа посвящена исследованию наиболее эффективных сочетаний каналов при анализе устоявшихся зрительно вызванных потенциалов с помощью индекса многомерной синхронизации.

**Ключевые слова:** зрительно вызванные потенциалы, нейроинтерфес, мозг-компьютер, индекс многомерной синхронизации, электроэнцефалография, ЭЭГ, фотостимуляция.

Первые упоминания о создании интерфейса «мозг-компьютер» начали появляться еще в начале второй половины XX столетия и были связаны, в первую очередь, с развитием возможностей электроэнцефалографии и попытками расшифровать отдельные импульсы сигналов мозга [1].

В настоящее же время это, ранее чисто экспериментальное направление начинает приобретать все более практический характер.

Нейроинтерфейсы находят все более широкое применение в медицине для помощи парализованным [2] пациентам, пациентам с рассеянным склерозом, перенесшим инсульт [3] и многим другим пациентам с поражениями нервной системы в качестве метода реабилитации [4].

Данные интерфейсы основываются на методе биологической обратной связи, обеспечивающей получение информации о текущем состоянии той или иной физиологической функции для обучения человека сознательному контролю и управлению этой функцией [5].

### Зрительно вызванные потенциалы

Одним из важнейших способов организации обратной связи служит реакция ЭЭГ на визуальные раздражители – зрительно вызванные потенциалы.

Особую привлекательность данный способ представляет именно как неинвазивное средство обратной связи, хотя это и ограничивается сложностью оптимизации множества различных параметров, которые необходимо настраивать совместно [6].

### Индекс многомерной синхронизации

Среди зарекомендовавших себя методов решения данной задачи особо выделяется индекс многомерной синхронизации (MSI), обладающий более высокой производительностью по сравнению с аналогами, благодаря чему он может использоваться в системах реального времени [7, 8].

Пример результатов работы индекса на массиве частот приведен на рис. 1.

В целях дальнейшей оптимизации применения данного алгоритма целесообразно сократить количество используемых им при анализе каналов, выделив наиболее эффективные с точки зрения конечной точности.

Для решения данной задачи в качестве исходных данных была выбрана база данных MAMEM SSVEP Database [9]. Данный датасет содержит записи ЭЭГ

11 субъектов при стимуляции мерцающим светом, используемые для изучения устойчивого состояния зрительно вызванных потенциалов.

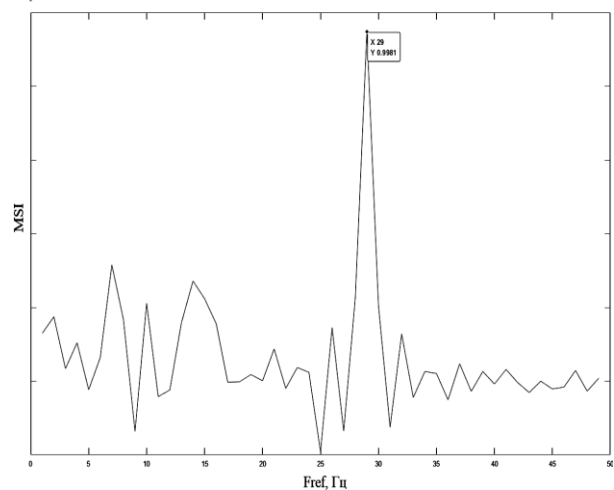


Рис. 1. MSI при определении частоты мерцания

Был использован набор данных, в котором испытуемые подвергались воздействию непрерывающегося мерцающего света из пяти пурпурных прямоугольников с частотами (6,66; 7,5; 8,57; 10 и 12 Гц), в результате чего были получены 256-канальные записи ЭЭГ.

В качестве опорных сигналов использовался набор из 8 чередующихся фазой ( $\sin/\cos$ ) кратных гармонических сигналов, начиная с искомой частоты из набора и заканчивая частотой, в 4 раза ее превышающей, соответственно.

Из исходных 256 каналов были отобраны 19, соответствующих международному стандарту «10-20», поскольку обработка всех сочетаний 256 каналов представляет сложную вычислительную задачу уже при размере сочетаний, равном 4 и более. Информация о соответствии была взята из файлов базы данных.

Эксперимент проводился для сочетаний  $C_{19}^1$ ,  $C_{19}^2$ ,  $C_{19}^3$ ,  $C_{19}^4$ ,  $C_{19}^5$  и  $C_{19}^8$ .

Размер окна обработки для MSI был взят 200 мс.

### Описание исследования

В первой части исследования для каждой группы сочетаний, разграниченных по размерам, выделялись сочетания, показавшие наилучший результат. Были выделены каналы с наибольшей частотой появления в данных сочетаниях (табл. 1).

Таблица 1

Каналы с наибольшей частотой появления									
Сочетание	Канал/Частота появления								
	C <sub>19</sub> <sup>1</sup>	94	2	96	202	37	116	69	18
6		5	5	3	3	3	2	2	
C <sub>19</sub> <sup>2</sup>	101	202	21	31	36	183	224	96	
	20	6	5	5	5	5	5	3	
C <sub>19</sub> <sup>3</sup>	101	126	224	21	31	94	202	36	
	21	7	6	6	6	6	6	5	
C <sub>19</sub> <sup>4</sup>	101	96	31	94	202	36	37	18	
	29	12	9	9	9	8	8	6	
C <sub>19</sub> <sup>5</sup>	101	37	96	94	18	69	47	202	
	29	17	13	12	10	9	9	8	
C <sub>19</sub> <sup>8</sup>	101	96	18	31	37	94	126	202	
	27	22	20	20	18	18	18	18	

Таблица 2

Сравнительные данные		
Описание выборки каналов	MSI	Каналы
Индивидуальный максимум	0,995055	–
Комбинация наиболее часто встречающихся	0,994743	18 31 37 94 96 101 126 202
Височная область (левая)	0,992834	84 85 86 95 97 105 106 107
Затылочная область	0,992301	99 100 101 110 119 128 129 141
Лобная область	0,991484	18 19 25 26 31 32 33 37

Во второй части исследования было произведено сравнение полученного набора каналов для сочетания C<sub>19</sub><sup>8</sup> с наибольшей частотой появления со средними значениями наилучших результатов по сочетаниям, а также с наборами каналов, физически находящихся вблизи каналов с наибольшей частотой появления в областях, содержащих наибольшее количество таких каналов (рис. 2).

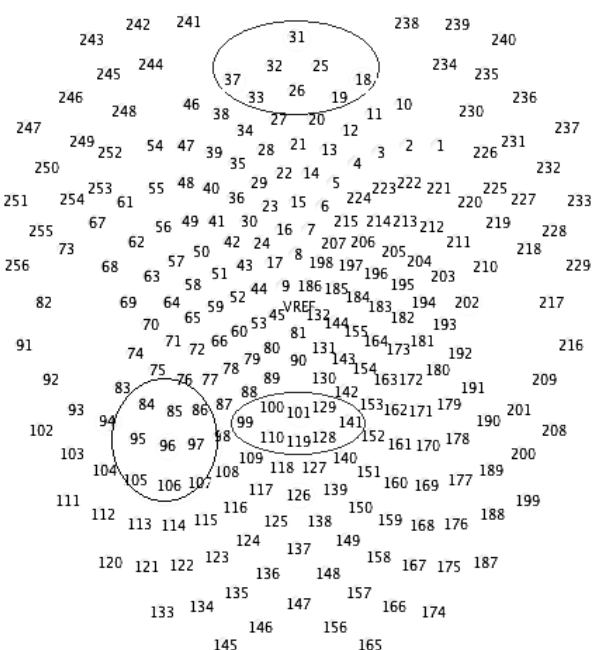


Рис. 2. Выбранные для сравнения области и каналы

Результаты второй части эксперимента приведены в табл. 2.

**Выводы по результатам**

По результатам исследования был сделан вывод, что применение MSI для одного канала не позволяет выделить конкретный наилучший канал для всех испытуемых, в отличие от применения двух и более каналов. Также можно говорить о слабой эффективности применения MSI на одном канале (рис. 3).

Во всех случаях, когда для исследования использовалось более одного канала, наибольшую частоту появления демонстрировал канал затылочной области «101».

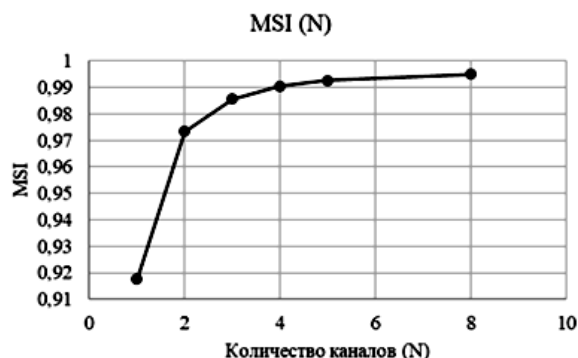


Рис. 3. Зависимость точности распознавания от количества каналов

Частоты появления остальных каналов носили более спонтанный характер, хотя нельзя не отметить, что каналы «202» и «224» также играют немаловажную роль в точности распознавания вплоть до порога исследования в 4 канала. В дальнейшем их роль снижается, а наличие канала «224» в сочетаниях и вовсе перестает играть значительную роль, чего нельзя сказать о каналах «96», «31», «37» и «94».

Также стоит отметить значительный рост важности наличия канала «18» с ростом количества каналов в сочетаниях на промежутке от 4 до 8.

Обобщая полученные результаты первой части эксперимента, стоит отметить, что наибольшую эффективность показали каналы из затылочной, височной (преимущественно левой) и лобной областей – именно поэтому для сравнения во второй части эксперимента и были выбраны каналы из этих областей в окрестностях соответствующих каналов с наибольшей частотой появления.

Полученные данные также могут свидетельствовать и о валидности полученных результатов: наилучшие результаты показывают каналы, расположенные в области зрительной коры (затылочная область) и областей головного мозга, отвечающих за зрительную память (височные области).

Как показывают результаты второй части исследования, комбинации каналов с различных областей дают более точный результат, чем каналы только из одной области, даже сгруппированные рядом с имеющим наибольшее влияние на конечную точность каналом «101».

В частности, наилучший усреднённый результат по всем испытуемым показала комбинация из каналов «18», «31», «37», «94», «96», «101», «126» и

«202»: она практически не уступила усредненному показателю по экспериментальным максимумам (комбинациям, которые показали наилучший экспериментальный результат для каждого отдельно взятого испытуемого).

#### *Литература*

1. Handbook: Technological and Theoretical Advances / C.S. Nam, A. Nijholt, F. Lotte // Brain-Computer Interfaces, CRC Press. – 2018. – P. 788.

2. Selecting the signals for a brain-machine interface / R. Andersen, S. Musallam, B. Pesaran // Current Opinion in Neurobiology. – 2004. – P. 720–726.

3. Brain-Machine Interface (BMI) in paralysis / U. Chaudhary, N. Birbaumer, M.R. Curado // Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. – 2015. – P. 9–13.

4. Gnezditsky V.V. Evoked brain potentials in clinical practice // Taganrog: Publishing house of TSURE. – 1997. – P. 252.

5. Current trends in Graz Brain-Computer Interface (BCI) research. / G. Pfurtscheller, N. Neuper // IEEE Trans Rehabil Eng. – 2000. – P. 216–219.

6. Comparative evaluation of state-of-the-art algorithms for SSVEP-based BCIs / V.P. Oikonomou, G. Liaros // Technical Report – eprint arXiv:1602.00904. – 2016. – P. 1–33.

7. Implementation of Robot-Human Control Bio-Interface When Highlighting Visual-Evoked Potentials Based on Multivariate Synchronization Index / S. Kharchenko, Y. Turovsky, R. Mescheryakov, D. Volf // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». – 2020. – Ufa, Russia.

8. Influence of Signal Preprocessing When Highlighting Steady-State Visual Evoked Potentials Based on a Multivariate Synchronization Index / S. Kharchenko, R. Mescheryakov, Y. Turovsky // Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. – 2021. – P. 102–111.

9. Comparative evaluation of state-of-the-art algorithms for SSVEP-based BCIs / V.P. Oikonomou, G. Liaros, K. Georgiadis, E. Chatzilari, K. Adam, S. Nikolopoulos, I. Kompatsiaris // Technical Report – eprint arXiv:1602.00904. – 2016.

---

#### **Крючков Илья Андреевич**

Студент каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа

Эл. почта: lqrukl@gmail.com

УДК 621

А.Б. Гомбоин, А.Б. Кураков

## Программа для оценки параметров походки по скелетной модели человека с помощью видео

Анализ походки человека часто проводится в клинических и фундаментальных исследованиях, но многие общие подходы исследований очень дорогие, ограничены данными и требуют специализированных знаний. Последние достижения в оценке позы на основе видео предполагают возможность анализа походки с использованием видео, полученного с устройств видеозаписи (например, видеокамера). На сегодняшний день в нескольких исследованиях были извлечены особенности походки человека с использованием оценки позы ноги. Однако в настоящее время отсутствует оценка подходов на основе видео с использованием набора данных о походке человека для широкого диапазона параметров походки на пошаговой основе и рабочего процесса для выполнения анализа походки по видео.

**Ключевые слова:** видеокамера, походка, ходьба, движение человека, программа, алгоритм скелетной модели нижних конечностей.

Люди интересовались изучением моделей ходьбы животных и людей на протяжении веков, начиная с Аристотеля в четвертом веке до нашей эры. Технологии анализа походки эволюционировали от использования Борелли смещенных шестов для изучения собственной походки до современных инструментов, включая видеозахват движения и другие инструменты для изучения ходьбы. Хотя технический прогресс продолжает расширять наши возможности по изучению ходьбы человека в различных условиях, многие ограничения сохраняются. Современные методы остаются дорогостоящими, часто требуют много времени и специального оборудования или опыта, которые часто не являются общедоступными.

В наше время большую популярность набирают цифровые камеры, с помощью которых можно обрабатывать видеозаписи и получать различную информацию, в нашем случае позы передвигающегося человека. Технология, которая этим занимается, называется компьютерным зрением.

Компьютерное зрение позволяет получать необходимые данные из видеопотока с целью распознавания объектов. Данная технология приобрела большую популярность в охранных предприятиях и имеет большую перспективу в медицинских целях.

Также компьютерное зрение позволяет изучать моторно-двигательную функцию человеческого тела [2], которая в большей степени является биометрическими данными. Данная функция человеческого тела ещё называется походкой человека, она показывает особенности позы и движения человека при ходьбе. Обработывая данные походки человека, можно получить полезные данные для медицины. Вследствие этого была идея разработать программу для изучения и построения скелетной модели нижних конечностей человека.

Цель – разработка программного обеспечения оценки параметров походки по скелетной модели человека с помощью видео.

Для достижения поставленной цели были выделены следующие задачи:

1. Исследовать предметную область.
2. Создать блок-схему программы.

### Предметная область

Походка человека непосредственно связана с биомеханикой человека. Она изучает статистику и движение человека. Самой главной задачей биомеханики является, как уже сообщалось выше, движение всех живых организмов, исследование их в двигательной деятельности и изучение полученных результатов.

В биомеханике есть несколько основных понятий: равновесие, сила, импульс, рычаги и перемещение [3].

Движение человека, а именно его ходьба, является сложной произвольной деятельностью, которая охватывает различные этапы нервной системы, мышц, связок, костно-суставный аппарат. Походка человека характеризуется несколькими основными детерминантами: вращение таза, наклон таза, сгибание ноги в коленном суставе, механизм флексии и экстензии голеностопного сустава, ротация коленного, голеностопного суставов, латеральное расположение таза [4, 5].

При нормальной организации ходьбы обеспечивается плавное движение общего центра тяжести тела. К примеру, 1–4-я и 6-я детерминанты, описанные выше, направлены на то, чтобы ограничить вертикальные перемещения общего центра тяжести. При различных патологиях или отклонениях опорно-двигательного аппарата или нервной системы очень часто наблюдается нарушение походки [6].

При исследовании походки используются следующие понятия: цикл шага (занятое время от начала контакта одной ноги до следующего контакта другой ноги), период переноса (время, когда одна нога не контактирует с плоскостью), двухопорный период (время, когда обе ноги находятся на плоскости), частота шага (число единичных шагов в единицу времени) (рис. 1).

### Алгоритм работы программы

1. Загружается видеозапись идущего человека, далее запускается обработка записи.

2. Из видеопотока берутся кадры, максимально удовлетворяющие для работы компьютера, при помощи соответствующих фильтров и выделяется фигура человека сравнением кадров с человеком и без.



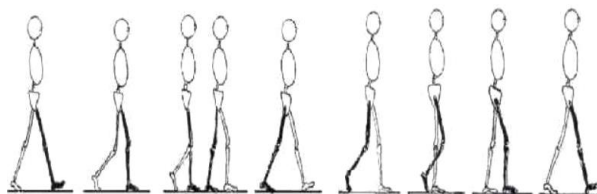


Рис. 1. Походка человека

3. Далее начинается поиск максимумов фигуры человека, затем построение и соединение линиями, тем самым создается скелет.

4. Выделяются на скелете нижние конечности скелета.

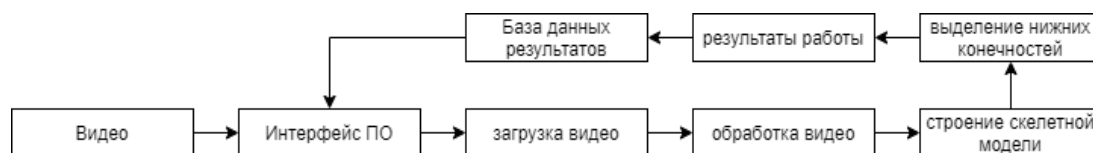


Рис. 2. Блок-схема программы

Стоит отметить обработку видео – сначала выделяются необходимые кадры и обрабатываются несколькими фильтрами, например гауссовским.

Далее кадры преобразовываются в черно-белое изображение и сравниваются, как показано выше, с кадрами, где присутствует человек и нет, для получения фигуры человека.

Алгоритм построения скелетной модели подробно описан в статье [1]. После выделяются нижние конечности человека и анализируются. Благодаря этому мы получаем полную информацию, необходимую для дальнейшего анализа и обработки, также на данном этапе происходит сравнение с имеющимися данными в базе данных.

Последним этапом является сохранение данных. Сбор данных необходим для сравнения при обработке изображения и получения динамики показателей человека в различные периоды времени, к примеру, для мониторинга состояния человека с нарушениями при движении.

#### Заключение

В результате данной работы была разработана программа для построения скелетной модели нижних конечностей человека по видеозаписи его походки. Поставленная перед нами задача была полностью выполнена. Полученные нами результаты будут использоваться в дальнейшей разработке данного программного обеспечения.

5. Происходит анализ полученной информации.  
6. Сохраняется результат работы, если это необходимо.

Блок-схема программы изображена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, программа имеет несколько модулей: интерфейс ПО [7, 8], загрузка видео, обработка видео, строение скелетной модели, выделение нижних конечностей, результаты работы, база данных результатов. База данных нужна для сравнения с предыдущими результатами работы. Интерфейс содержит различные поля для удобства пользователя. К примеру, загрузка видео, его обработка, вывод результатов и сохранение.

#### Литература

1. Катаев М.Ю., Катаева Н.Г., Коробко А.П., Шаймарданов Т.М. Методика построения фронтальной скелетной модели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journal.tusur.ru/storage/97952/23-Катаев-Катаева-Коробко-Шаймарданов.pdf?1516335483>, свободный (дата обращения: 16.09.2020).
2. Колесникова Г.П., Формальский А.М. Об одном способе моделирования походки человека // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 1 (25).
3. Бегун П.И., Шукейло Ю.А. Биомеханика. – 2012.
4. Круткин В.Л. Техники тела и движения человека // Журнал социологии и социальной антропологии. – 2014. – Т. 17, № 2.
5. Миловзорова М.С. Анатомия и физиология человека. – М.: Медицина, 1972. – Т. 231. – С. 1.
6. Капанджи А. Нижняя конечность. Функциональная анатомия. – Litres, 2020.
7. Мандел Т. Разработка пользовательского интерфейса. – Litres, 2019.
8. Лаврищева Е.М. Интерфейс в программировании. – 2007.

#### Гомбоин Александр Булатович

Студент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа  
Эл. почта: a.gomboin@mail.ru

#### Кураков Андрей Борисович

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: sniperaft@bk.ru

**А.С. Стецко, В.А. Гойник, В.В. Набиуллин**

## Выбор входного языка для графической среды программирования

Сравниваются три формальных графических языка программирования: диаграммы Насси–Шнейдермана, R-схемы И. Вельбицкого и ДРАКОН В. Паронджанова. Цель сравнения – выбор входного языка графической среды программирования, разрабатываемой авторами в рамках группового проектного обучения (ГПО) АСУ-1908. Перечислены достоинства и недостатки сравниваемых языков. Обоснован выбор языка ДРАКОН.

**Ключевые слова:** ДРАКОН, ДРАКОН-схемы, блок-схемы, диаграммы Насси–Шнейдермана, R-схемы, визуальное программирование.

В современном мире всё больше людей нуждаются в перемещении своих знаний и умений на компьютерную основу, т.е. в формализации знаний. Для этого им, как правило, приходится обращаться к программистам, так как они не владеют и не имеют возможности овладеть языками, «понятными» компьютеру. С другой стороны, программистам, работающим на этих специалистов, приходится овладевать знаниями о предметной области и фактически приобретать новую квалификацию.

Это обстоятельство обусловило попытки профессионалов-программистов создать формальный алгоритмический язык, легко усваиваемый непрофессионалами. Результат одной из них – графический язык ДРАКОН (дружелюбный русский алгоритмический язык, который обеспечивает наглядность) – общедоступный интеллектуальный инструмент, специально сконструированный для систематизации и автоформализации профессиональных знаний.

Так как ДРАКОН является формальным языком, любое правильное высказывание (ДРАКОН-схема) имеет однозначную интерпретацию. Поэтому возможно преобразование ДРАКОН-схемы в текст программы на любом текстовом языке программирования. Следовательно, ДРАКОН можно использовать в качестве входного языка графической среды программирования, ориентированной на непрограммиста.

Но, помимо ДРАКОНа, существуют другие формальные языки графического программирования: диаграммы Насси–Шнейдермана, NOS-схемы, схемы «гринпринт», SPD-диаграммы фирмы NEC, PAD-схемы фирмы Хитачи, деревья и таблицы решений, схемы зависимости, язык SDL и его производные, система BLS, R-схемы И. Вельбицкого, π-схемы В. Прохорова и т.д. [1]. Появляется проблема выбора формального языка визуального программирования. В данной статье проведено сравнение ДРАКОН-схем с диаграммами Насси–Шнейдермана и R-схемами, потому что эти средства позволяют строить именно блок-схемы программ. Кроме того, выбранные средства, в отличие от большинства других подобных, представлены общедоступной информацией для ознакомления в виде книг и статей.

Далее сравниваются представления алгоритма программы, решающей следующую задачу: необходимо в непустом стеке, содержащем целые положительные числа, найти сумму его чётных элементов, сумму нечётных и вывести их на консоль.

### ДРАКОН

Алгоритм для программирования в виде ДРАКОН-схемы изображён на рис. 1.



Рис. 1. ДРАКОН-схема для программирования, построенная в среде «Фабула»

ДРАКОН-схемы – это блок-схемы, построенные по правилам языка ДРАКОН. Они лишены таких недостатков блок-схем, как отсутствие эргономичности, трудностей в генерации объектного кода.

### Диаграмма Насси–Шнейдермана

Проведём сравнение некоторых макроикон ДРАКОН-схемы и элементов диаграммы Насси–Шнейдермана (N-S-диаграммы), изобразим решение упомянутой ранее задачи в виде N-S-диаграммы для программирования (таблица, рис. 2) [2].

Компактность – одно из преимуществ их диаграмм над блок-схемами. Остальные преимущества исходят из условных обозначений элементов [3].

К недостаткам диаграмм Насси–Шнейдермана относят сложность построения для изображения больших алгоритмов. Из таблицы и рис. 2 можно также заключить, что символ процесса не классифицирован. Если бы для N-S-диаграмм создавалась графическая среда программирования, то идентификация комментария, вывода на консоль и пр. легла бы

на плечи пользователя. Такое решение противоречит задачам визуального программирования.

#### Сопоставление макроикон ДРАКОН-схемы и элементов диаграмм Насси–Шнейдермана

Макроикона ДРАКОН-схемы	Аналогичный элемент N-S-диаграммы
Примитив	Отсутствует
Силуэт	
Ветка	
Действие	Символ процесса
Комментарий	
Ввод в консоль	
Вывод на консоль	
Вставка	
Вопрос	Символ решения
Переключатель	
Цикл с постусловием	Символ итерации
Цикл-счётчик	

`void getSums(unsigned* Stack)`

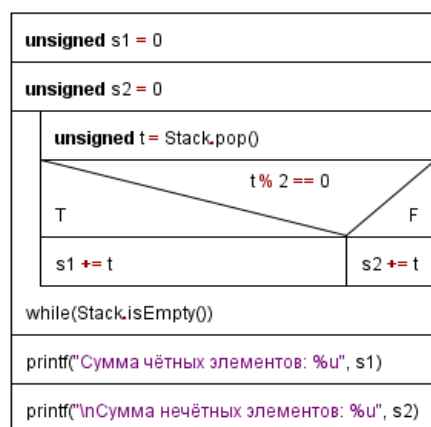


Рис. 2. N-S-диаграмма для программирования, построенная в среде «structorizer»

#### ● R-schemes of stack analysis

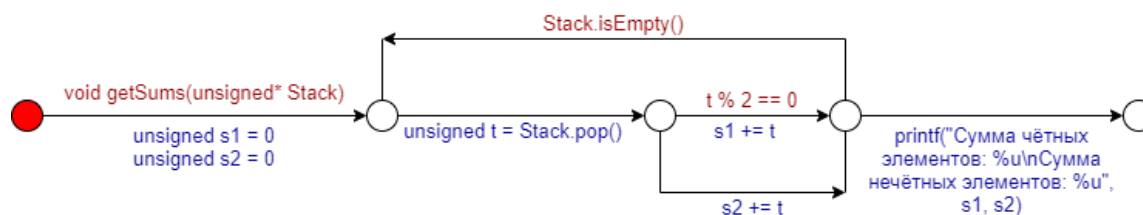


Рис. 3. R-схема для программирования

#### Выводы

Язык ДРАКОН имеет по сравнению со своими аналогами как преимущества, так и недостатки. Все упомянутые средства стремятся сделать программирование более простым и доступным для человека, превосходя тем самым парадигму текстового программирования. Некоторые методы (N-S-диаграммы) разделяют позицию Эдсгера Дейкстры и не предусматривают безусловный переход, другие же, в том числе и ДРАКОН, – предусматривают. ДРАКОН-схемы уступают аналогам в компактности, но так как разработчики между компактностью и эргономичностью выбрали второе, этот недостаток естествен. При этом, в отличие от N-S-диаграмм и R-схем, ДРАКОН-

#### R-схема

R-схемы – концепция программирования ориентированными графами, предложенная И.В. Вельбицким в 2017 г. [4]. Изобразим решение упомянутой ранее задачи в виде R-схемы (рис. 3).

К достоинствам R-схем можно отнести компактность, наглядность. Действительно, была достигнута цель избавить пользователя от изучения неестественных для человека операторов. Составляя R-схему, он ставит перед собой следующие цели: определить состояние программы, условия перехода из одного состояния в другое, действия, совершаемые в процессе перехода. Также такие схемы удобны для описания классов и структур данных. К недостаткам можно отнести потерю качества при размещении на дугах содержательных текстов (длинной последовательности команд, подробных комментариев).

В ДРАКОН-схемах такая проблема тоже имеется, поэтому R-схемы иногда сравнивают с ДРАКОН-схемами, вытянутыми по горизонтали. Несмотря на компактность и наглядность R-схем, они не эргономичны. У неопытного пользователя будут затруднения в восприятии алгоритма без предварительного ознакомления с правилами построения. Отсутствие классификации действий влечёт те же последствия, что и в N-S-диаграммах. Важный недостаток R-схем – это отсутствие специальной среды для конструирования на сегодняшний день.

Схема на рис. 3 построена в программе «Flowchart Maker & Online Diagram Software». Эта программа предназначена для создания всевозможных схем (электрических схем, схем компьютерных сетей, блок-схем, схем баз данных и т.д.), но отдельного пункта «R-схемы» в этом перечне нет.

схемы обладают наибольшим набором графоэлементов. Чем больше этот набор, тем проще пользователю классифицировать шаги выполнения алгоритма и тем меньше пользователю предстоит изучать особенности интерпретируемого языка. Следовательно, из перечисленных формальных языков визуального программирования именно у ДРАКОН-схем имеется потенциал как у графической среды программирования. На текущий момент не существует компромисса, который бы включал в себя эргономичность ДРАКОН-схем, отсутствие безусловных переходов N-S-диаграмм и компактность R-схем. Если бы такое средство появилось, оно бы стало главным конкурентом всех формальных языков программирования.

Данная работа выполнялась в рамках проекта ГПО АСУ-1908 «Графическая среда программирования ДРАКОН-Си».

*Литература*

1. Паронджаров В.Д. Как улучшить работу ума: Алгоритмы без программистов – это очень просто! – М.: Дело, 2001. – 360 с.
2. Семинар. Диаграммы Насси–Шнейдермана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inf.1sept.ru/2006/03/12.htm> (дата обращения: 13.08.2021).
3. Flowchart techniques for structured programming [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cs.umd.edu/hcil/members/bshneiderman/nsd/1973.pdf> (дата обращения: 13.08.2021).
4. Вельбицкий И.В. Интеллектуальная визуальная 3d+ полиглот-концепция программирования без языков программирования // System Research & Information Technologies. – 2017. – Вып. 3.

**Стецко Алексей Сергеевич**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: stetsko-alexeist2015@ya.ru

**Гойник Владимир Алексеевич**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: vova.goynik.90@gmail.com

**Набиуллин Владислав Валерьевич**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: k4t4ny4@mail.ru

Ю.А. Матвиенко, В.В. Набиуллин, М.Ю. Катаев

## Особенности построения ортофотоплана по данным БПЛА

Исследована работа по построению ортофотоплана по полученным снимкам с БПЛА. Изучены различные типы БПЛА, рассмотрены вопросы создания полетного задания и обработки полученных снимков. В настоящее время в Российской Федерации все чаще начинают применяться беспилотники для решения задач в различных сферах жизни человека, используя анализ земной поверхности. По сравнению с классическим способом беспилотники решают задачи топосъемки быстрее, точнее и достовернее.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, ортофотоплан, аэросъемка, обработка данных с БПЛА, БПЛА.

При аэрофототопографической съемке изображения местности получают путем ее фотографирования с помощью цифровых камер. Этот этап аэрофотосъемки в последнее время осуществляют с помощью беспилотных летательных аппаратов разного типа. Цель работы, представленной в статье, заключается в получении ортофотоплана, удовлетворяющего заранее поставленным требованиям [1].

БПЛА подразделяются по виду конструкции на такие типы, как самолетные и вертолетные. Вертолетные типы имеют несколько преимуществ, таких как возможность вертикального взлета и посадки, в том числе на неподготовленные площадки, а также снижение скорости в полете почти до нуля, т.е. имеют возможность зависнуть в воздухе. Далее представлены особенности подготовки ортофотоплана местности, построенного на основе полученных изображений с борта БПЛА.

### Создание полетного задания

Оператор до осуществления полета должен задать высоту полета, шаг полетных линий (далее – ЛЗП – линия заданного пути, вдоль которой ведется съемка). Маршрут полетного задания для БПЛА закладывается таким образом, чтобы перекрытие изображений составляло от 50–70% по вертикали и горизонтали [2]. Скорость пролета летательного аппарата при аэрофотосъемке варьируется от 30 до 80 км/ч. В воздухе помимо наклонов судна для изменения направления на аппарат воздействует ветер. Стоит учесть, что не гарантировано получение изображений требуемого разрешения и с требуемым перекрытием. Это первая проблема, вторая – существование минимального радиуса поворота у БПЛА, а именно при переходе с одной ЛЗП на другую, соседнюю, ЛЗП возможно получение изображений в неправильных координатах.

Из рис. 1 видно, что реальная траектория полета, отмеченная красным цветом, не сходится с запланированной, отмеченной желтым цветом, и как следствие аэросъемка происходит вне требуемого полетного задания, что пагубно повлияет на качество ортофотоплана, как пример – не отснятый кусок запланированного маршрута. Это происходит из-за ветрового воздействия по высоте и направлениям относительно запланированной линии. В свою очередь, данное действие вызывает за собой проблемы смещения изображений относительно друг друга за счет изменения

направления поля зрения цифровой камеры. Стоит учесть, что при таких смещениях изменяется не только положение изображения относительно запланированного, но и его форма, что важно учитывать при обработке изображений для создания ортофотоплана.

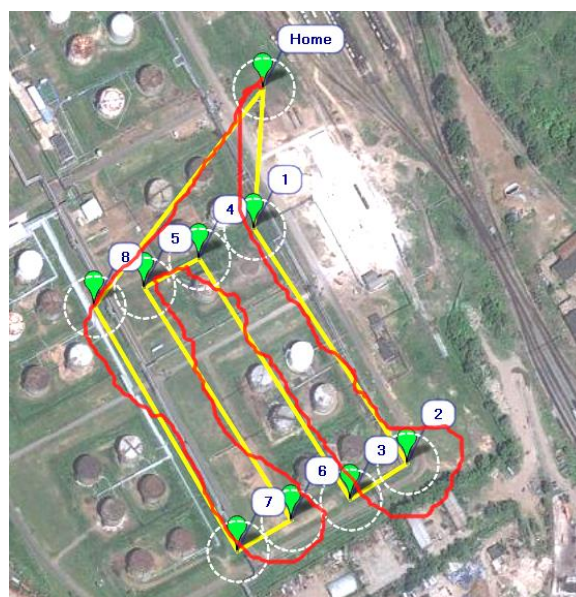


Рис. 1. Реальная траектория полета

### Обработка полученных снимков

Первым шагом на пути создания ортофотоплана служит предобработка полученных данных. Под этим понятием подразумевается необходимость удаления среди получившегося набора изображений таких, в которых были замечены артефакты. Артефактом в данном случае является снимок, полученный, как правило, из-за воздействия порывов ветра, а также при повороте летательного аппарата.

Если использовать такое программное обеспечение, как Agisoft Metashape (ранее данный продукт мог называться Agisoft GeoScan), то оно при выравнивании массива изображений (снимков) «выдает» такие артефакты, как показано на рис. 2 и 3. Нетрудно заметить, что на рис. 2, во вкладке «Снимки», изображение с артефактом отличается от всех других отсутствием значка «галочка». Если рассматривать данный снимок, то он был выполнен при смене траектории полета БПЛА, когда возможно отклонение оси

визирования камеры более 10 градусов, что является недопустимым значением при создании ортофотоплана.

На рис.е 3 во вкладке «Рабочая область» – снимок с артефактом, но уже, чтобы не рассматривать и не искать значок «галочка», можно увидеть, что данная программа не смогла сделать автоматическое выравнивание снимка и его необходимо просмотреть его и предпринять какие-то действия для решения проблемы, например удалить его или вручную сделать выравнивание.



Рис. 2. Вкладка «Снимки»

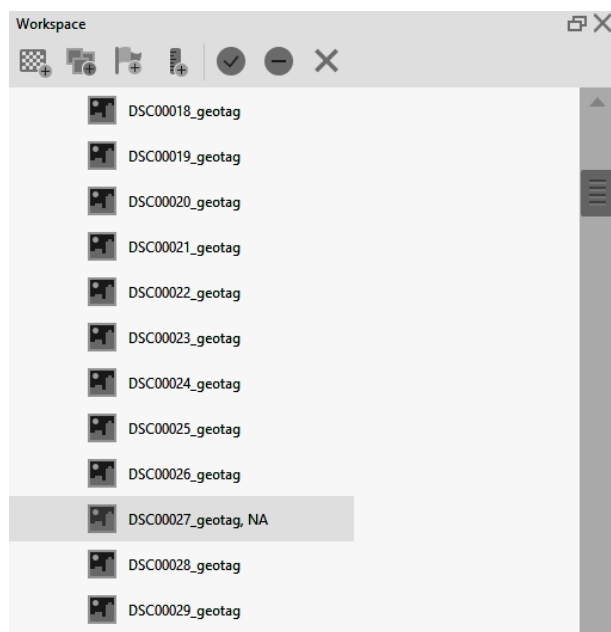


Рис. 3. Вкладка «Рабочая область»

Следующим шагом обработки полученных снимков является построение самого ортофотоплана. Ортофотоплан – это фотографический план местности, который создаётся на базе аэросъемки. Он дает возможность в деталях отобразить ситуацию на земной поверхности [3]. Для построения ортофотоплана необходимо использовать профессиональное программное обеспечение, которую, в свою очередь, сможешь собрать из полученных данных необходимый объект. Такие программы бывают как с открытым исходным кодом, такие как Open Drone Map, так и полностью коммерческие, например Pix4D. Результат работы программного обеспечения Open Drone Map представлен на рис. 4.

Полученные данные, как правило, имеют формат GeoTIFF, которые в дальнейшем можно использовать в целях анализа земной поверхности. В отличие от обычного, TIFF имеет совместимость с мета-

данными о географической привязке. Также стоит отметить, что географическая привязка является одной из проблем получения ортофотоплана. Как правило, БПЛА имеет в своей комплектации специальное устройство для геопривязки изображений, но так как он сам находится в воздухе, то и геоданные получаются с воздуха. Это достаточно легко проверить, открыв свойство любого снимка, полученного с БПЛА, пример представлен на рис. 5.



Рис. 4. Фрагмент ортофотоплана, созданного по материалам аэрофотосъемки с БПЛА с помощью Open Drone Map

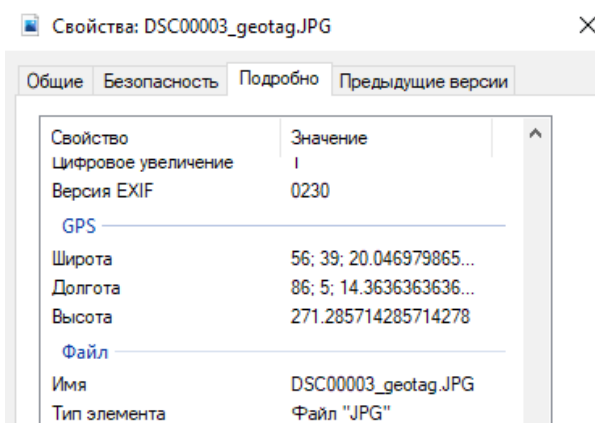


Рис. 5. Свойство снимка

Для решения данной проблемы опытные специалисты в геоинформационной отрасли применяют так называемый «Маркер», или объект, размещаемый для обозначения ключевой геодезической точки на земной поверхности. Маркеры применяются для оптимизации результатов расчёта положений камер и их параметров внутреннего ориентирования, что позволяет улучшить результаты. Для повышения точности геопривязки моделей необходимо равномерно распределить в пределах области интереса минимум

пять наземных опорных точек, для достижения оптимального результата следует использовать 10–15 опорных точек [4].

Ещё одной особенностью построения ортофотоплана является такой факт, что последовательно идущие фотоснимки не всегда могут иметь зоны тройного перекрытия, что, в свою очередь, при дальнейшей обработке кадров является такой проблемой, как потеря полноценной картины снимаемой местности.

На рис. 6 можно наблюдать данную особенность, чаще с ней можно столкнуться ближе к краям композитного изображения. Композитное изображение было получено с помощью Image Composite Editor [5].

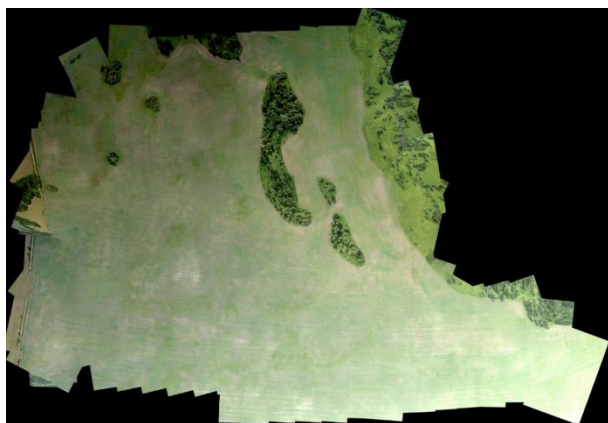


Рис. 6. Полученное композитное изображение в Image Composite Editor

Также при обработке тех же снимков в Agisoft Metashape можно наблюдать эту проблему не только на краях, но и в других местах, как показано на рис. 7.

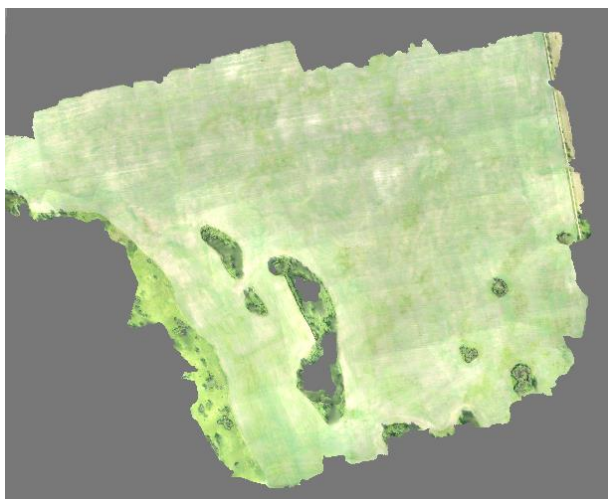


Рис. 7. Полученное композитное изображение в Agisoft Metashape

Визуальный анализ показывает, что была потеря каких-то изображений (для этого рисунка одного или нескольких из двух тысяч) или невозможность «состыковать» изображения между собой. Все вышесказанное свидетельствует о том, что большинство программ не могут правильно сшить весь объем полученных данных с БПЛА.

Это может быть связано опять же с погодными условиями или неправильно настроенным полетным заданием.

#### Вывод

В данной статье приведены основные особенности формирования ортофотоплана по изображениям, полученным с борта БПЛА. Представлены основные этапы формирования ортофотоплана от построения полетного задания для БПЛА до визуального анализа полученных изображений. Приведены реализованные ортофотопланы в различных программных продуктах и показаны особенности, которые необходимо учитывать при создании ортофотоплана.

#### Литература

1. Богомазов С.В. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: метод. указания. – Пенза: Изд-во РИО ПГСХА, 2011. – 120 с.
2. Прокладка траектории беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа [http://tm.spbstu.ru/Прокладка\\_траектории\\_полета\\_БПЛА](http://tm.spbstu.ru/Прокладка_траектории_полета_БПЛА), свободный (дата обращения: 28.09.2021).
3. Создание ортофотопланов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sovzond.ru/services/fotogrammetriya/ortophotoplan/>, свободный (дата обращения: 10.08.2021).
4. Добавление меркеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.agisoft.com/pdf/MS\\_1.6\\_tutorial\\_ru\\_Orthomosaic\\_DEM.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/MS_1.6_tutorial_ru_Orthomosaic_DEM.pdf), свободный (дата обращения: 29.08.2021).
5. Image Composite Editor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor/>, свободный (дата обращения: 01.09.2021).

#### Матвиенко Юрий Алексеевич

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [matvienko.yu.438-1@e.tusur.ru](mailto:matvienko.yu.438-1@e.tusur.ru)

#### Набуллин Владислав Валерьевич

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [k4t4ny4@mail.ru](mailto:k4t4ny4@mail.ru)

#### Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [kmy@asu.tusur.ru](mailto:kmy@asu.tusur.ru)

УДК 004.932.2

А.А. Мороз, К.С. Некипелов

## Сравнение методов поиска локальных центров тяжести фигуры человека по ее изображению

Представлено сравнение методов поиска центров тяжести человеческих фигур по их изображениям. Рассмотрены основные методы поиска центра тяжести на основе изображений фигуры человека, восстанавливаемых из видеоматериала.

**Ключевые слова:** походка человека, центр тяжести, методы поиска.

В наши дни информационные технологии играют ключевую роль в жизни общества. С развитием цифровых систем и технологий открываются новые области для исследований, одной из таких является область обработки изображений. Благодаря развитию данного направления вокруг людей появляется всё больше возможностей как для собственной реализации, так и для контроля безопасности, в исследованиях космоса и Земли, для благоустройства умных городов и многого другого. Главной же задачей таких исследований стоит обработка множества данных, а проблема заключается в их грамотном анализе.

Одна из проблем – это изучение генома человека путем обработки его биометрических данных. Частью всего генома является моторная деятельность человека, его походка. Обычно походкой называют особенности поз и движений человека при ходьбе. Данные, которые можно получить благодаря обработке изображений шагающего человека и их анализ, могут быть полезны в различных сферах, таких как медицина, спорт, система безопасности. Исходя из этого, было решено провести исследование эффективности различных методов по определению параметров походки человека и разработать приложение на основе полученных данных. Интерес к изучению данной области обусловлен связью походки человека и состоянием его физического и психологического здоровья. Поэтому разработка данного приложения является актуальной в наше время.

Объектом данной работы являются методы поиска центра тяжести (ЦТ) фигуры человека.

Цель – поиск наиболее точного метода поиска локальных ЦТ фигуры человека по ее изображению.

Для выполнения цели необходимо решить следующие задачи:

- Поиск используемых методов поиска центров масс.
- Использование всех найденных методов на одном наборе изображений и сравнение результатов.

Обработка видеозаписи происходит посредством выделения последовательности кадров из видеоматериала и дальнейшего использования на них группы фильтров, таких как медианный и гауссовский, выравнивания шумов и приведения кадров к одинаковым состояниям. После чего находится разность двух изображений (из первого изображения с фигурой вычитается второе изображение – без неё), благодаря чему получается изображение с фигурой

человека. Далее производится перевод полученного результирующего изображения в черно-белое состояние с последующей очисткой результирующего изображения от артефактов, появляющихся при разности двух кадров, с целью получения силуэта человеческой фигуры [2]. Таким образом, мы получаем изображение, содержащее фигуру человека, которую возможно быстро и качественно обработать на следующем этапе работы приложения.



Рис. 1. Обработанный кадр видеозаписи

После получения набора обработанных кадров видеозаписи можно приступить к сравнению методов. Первый метод основан на значениях цветов пикселей. Координаты точки определяются по формуле:

$$x_c = \frac{\sum \sum (x \times I(x, y))}{\sum \sum I(x, y)}, \quad (1)$$

где  $x_c$  – координата центра масс;  $I(x, y)$  – цвет пикселя, 0 для черного, 1 для белого;  $x$  – номер пикселя.

Результатом использования данного метода стал график, изображенный на рис. 2.

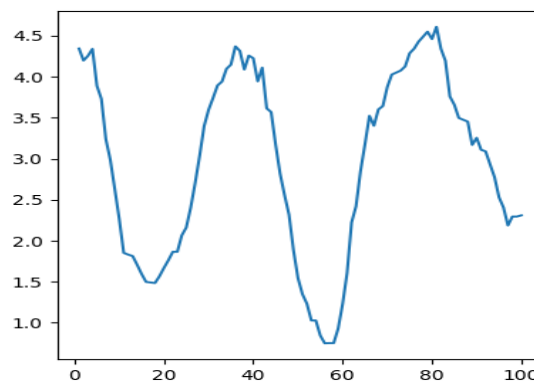


Рис. 2. Метод цветов пикселей



Далее, испытывались методы, основанные на факте того, что координаты центра тяжести прямо пропорциональны ширине и высоте фигуры человека, в результате чего получили графики, изображенные на рис. 3 и 4.

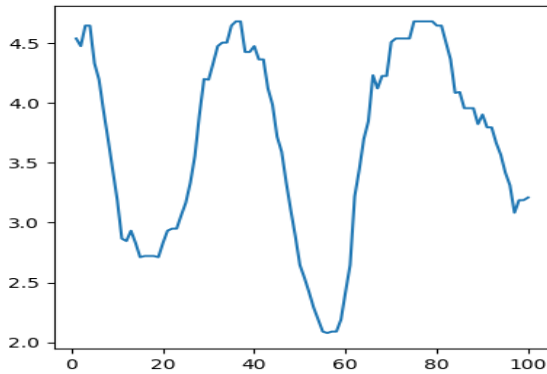


Рис. 3. Метод пропорций по ширине

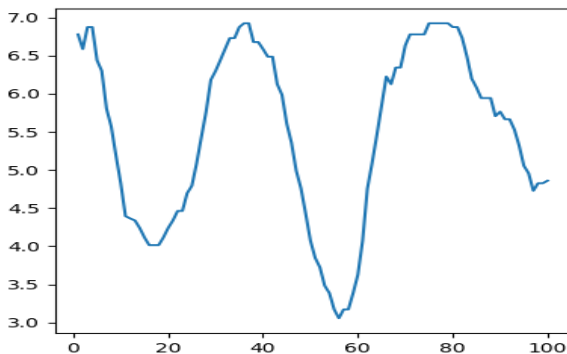


Рис. 4. Метод пропорций по высоте

Как видно из рис. 3 и 4, различия в точности этих методов практически нет.

После этого было решено проверить метод, основанный на использовании отношения ширины к высоте. Результатом работы данного метода стал график, изображенный на рис. 5.

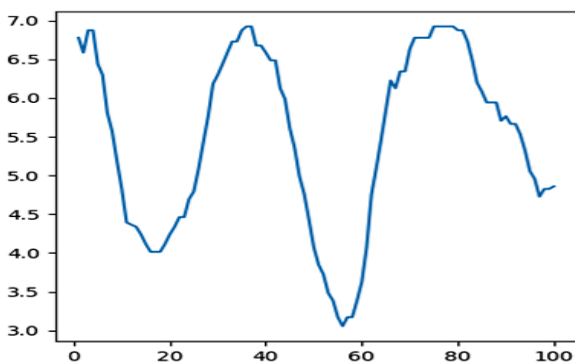


Рис. 5. Метод отношения величин

Следующим методом оказался поиск пересечения двух диагоналей изображения, основанный на теореме Пифагора, по формуле

$$h^2 + w^2 = d^2, \quad (2)$$

где  $h$  – высота фигуры человека;  $w$  – ширина фигуры человека;  $d$  – диагональ изображения. Результат использования данного метода продемонстрирован на рис. 6.

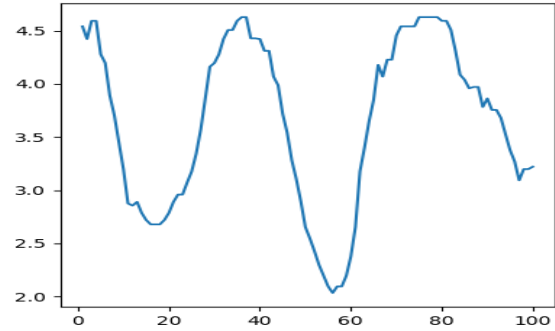


Рис. 6. Метод пересечения диагоналей

Опять же из рис. 6 видно, что любой метод, основанный на параметрах изображения, таких как ширина и высота, не дает большой точности к итоговому результату.

В связи с этим было решено использовать метод на основе выделения контуров человеческого тела по изображениям нахождением центра тяжести и относительного расстояния от него до контура человека.

Алгоритм обработки походки человека основан на поиске и выделении контура человека с поступающих изображений, после чего находится центр тяжести человека, его координаты  $x_{\text{цт}}$   $y_{\text{цт}}$ . Определив эти координаты, необходимо рассчитать основополагающий параметр этого метода, кривую «dist», которая является расстоянием от центра тяжести до контура [4]. С помощью этого параметра мы можем оценить особенности походки и считать необходимые данные, а также на основе кривой определить другие параметры, необходимые для дальнейшей диагностики. Каждому изображению будет соответствовать свой график кривой dist (кривая изображена на рис. 7), рассчитанной по формуле

$$\text{dist}(i) = \sqrt{(x_{\text{centr}} - x(i))^2 + (y_{\text{centr}} - y(i))^2}. \quad (3)$$

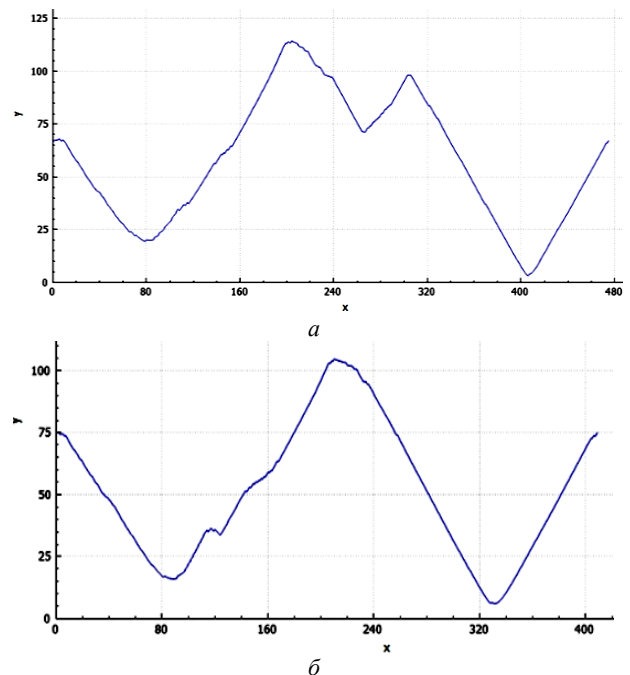


Рис. 7. Кривые dist: а – фаза отдаления ног; б – фаза сближения ног

После обработки всех изображений и расчёта кривой *dist* необходимо убрать возможные шумы и сгладить её с помощью специального фильтра [5]. Без шумоподавления в результате анализа могут возникнуть различные фантомные участки, которые приводят к неверным выводам и вычислениям программы. Следующий этап работы алгоритма заключается в поиске локальных максимумов и минимумов кривой, необходимых для определения фаз движения человека, и выделении участка кривой, отвечающего за ноги и голову.

Изучая поведение кривой *dist* и вытекающих из неё основных параметров, можно интерпретировать в фазы движения ног. Количество пиков, их ширина, амплитуда говорят о том, какая именно сейчас фаза движения человека, и, отталкиваясь от такого анализа, можно рассчитать другие параметры и отклонения от нормы.

#### **Заключение**

В итоге проделанной нами работы были разработаны и проанализированы методы определения параметров походки человека и выбран самый точный метод поиска ЦТ из сравниваемых. Он будет использоваться в дальнейшей работе над проектом. Разрабатываемый метод позволяет более детально наблюдать за общим движением человека, что впоследствии также поможет в более детальном описании генома и характера походки человека.

Работа выполнена в рамках проекта ГПО АСУ-1902 под руководством проф., д.т.н. М.Ю. Катаева.

#### *Литература*

1. Катаев М.Ю., Катаева Н.Г., Коробко А.П., Шаймарданов Т.М. Методика построения фронтальной скелетной модели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journal.tusur.ru/storage/97952/23-Катаев-Катаева-Коробко-Шаймарданов.pdf?1516335483>, свободный (дата обращения: 16.09.2020).
2. Катаев М.Ю., Коробко А.П. Построение скелетной модели фигуры человека по потоку изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-skeletnoy-modeli-figury-cheloveka-po-potoku-izobrazheniy/viewer>, свободный (дата обращения: 17.09.2020).
3. Катаев М.Ю., Коробко А.П., Котельникова Н.А. Оценка угловых параметров походки человека из скелетной модели, полученной на основе обработки изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26151099&>, свободный (дата обращения: 17.09.2020).
4. Алгоритм обнаружения контуров изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/467611/>, свободный (дата обращения: 03.03.2020).
5. SciPy Cookbook, Smoothing of a 1D signal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scipy-cookbook.readthedocs.io/items/SignalSmooth.html>, свободный (дата обращения: 13.09.2020).

---

#### **Мороз Артём Андреевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [artyom.moroz.00@gmail.com](mailto:artyom.moroz.00@gmail.com)

#### **Некипелов Кирилл Станиславович**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [kirilld54@gmail.com](mailto:kirilld54@gmail.com)

Д.К. Нгуен, С.В. Муравьев

## Сегментация изображений методом наращивания областей при автоматическом обнаружении дефектов сварки

Контроль поверхности сварных швов обычно выполняется невооруженным глазом и во многом зависит от опыта оператора. В статье представлен подход к реализации метода наращивания областей, используемого для автоматического разбиения изображения сварного шва на дефектную и бездефектную области. Начальные точки для алгоритма наращивания области выбираются на основе анализа гистограммы интенсивности изображения, после чего область дефекта наращивается на основе ее среднего значения интенсивности. Проверка предложенного подхода на реальных фотоизображениях показывает, что он позволяет обнаруживать разные типы дефектов сварного шва с достаточно высокой точностью при условии высокого качества исходных изображений.

**Ключевые слова:** сварной шов, контроль поверхности, визуальный контроль, алгоритм наращивания области, характеристика яркости, распознавание дефектов.

Контроль качества поверхности сварных швов является важным этапом в процессе производства металлоемких изделий. Этот этап реализуется с помощью визуального контроля, который обычно осуществляется специально обученным оператором [1]. Однако при большом объеме контрольных работ повышается вероятность ошибок контроля, что ведет к снижению эффективности этой процедуры. Поэтому возрастает актуальность автоматизации обнаружения дефектов сварного шва на его фотоизображении с привлечением современных технологий обработки изображений и компьютерного зрения.

Основной операцией обработки изображения является его *сегментация*. Эта операция разделяет изображение на однородные области или, другими словами, определяет границы однородных областей изображения. Каждая однородная область обычно соответствует реальному объекту на изображении. Тогда в результате сегментации объекты на изображении помечаются разными областями.

Известны различные методы сегментации изображений: пороговый, кластеризация, выявление границ, наращивание областей и т.д. Пороговый метод сегментации [2, 3] выделяет искомые области на основе разницы в значениях интенсивности цвета между пикселями. Этот метод хорошо работает для простых изображений с двумя объектами. Пороговое значение обычно рассчитывается как среднее значение интенсивностей яркости выбранных оператором вручную пикселей, представляющих область дефекта сварного шва (см. например, [3]).

Полной автоматизации можно достичь применением комбинации порогового метода с другими методами сегментации изображения, в частности, с методом наращивания областей (НО).

Метод НО отображает каждый пиксель входного изображения в набор областей [4, 5], для чего выбираются начальные точки-пиксели (seeds) и к ним добавляются соседние однородные пиксели. От выбора подходящей начальной точки зависит качество результата сегментации.

В этой статье предложен алгоритм сегментации для автоматического обнаружения дефектов сварного шва, реализующий подход, при котором пороговый

метод помогает выбрать начальные точки на входном изображении для метода НО, после чего дефектная область наращивается на основе ее среднего значения интенсивности.

### Выбор начальных точек

Гистограмма интенсивности изображения – это график распределения количества пикселей по уровням интенсивности (или уровням серого цвета) оцифрованного изображения [6] (рис. 1).

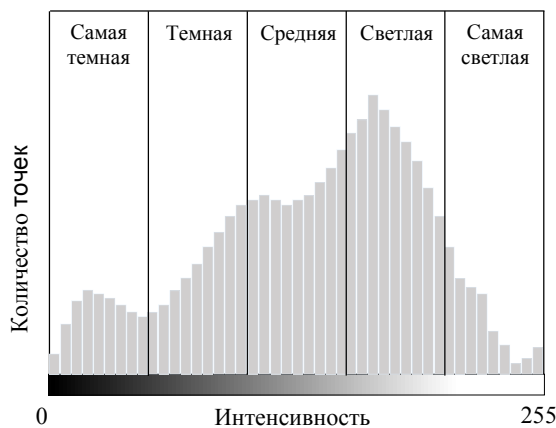


Рис. 1. Гистограмма изображения

Значения интенсивности (горизонтальная ось гистограммы) изменяются в диапазоне от 0 до 255 или при их нормировании путем деления на 255 – от 0 до 1. Значение 0 соответствует самому темному, т.е. чистому черному цвету, а максимальное значение интенсивности 255 (или 1 при нормировании) соответствует чистому белому цвету.

Таким образом, чем больше пикселей изображения располагается в области гистограммы, близкой к равной 0 интенсивности, тем темнее изображение; и чем больше пикселей изображения располагается в области гистограммы, близкой к равной 255 интенсивности, тем светлее изображение. Часто горизонтальную ось гистограммы разбивают на пять равных областей [7] (см. рис. 1) по степени интенсивности тона: самая темная (черная); темная; средняя; светлая и самая светлая (белая).

Любую реальную гистограмму можно характеризовать минимальной  $h_{\min}$  и максимальной  $h_{\max}$  ин-

тенсивностями (рис. 2). Тогда ширина  $l$  каждой из пяти областей разбиения определяется по формуле

$$l = (h_{\max} - h_{\min}) / 5 = 0,2(h_{\max} - h_{\min}). \quad (1)$$

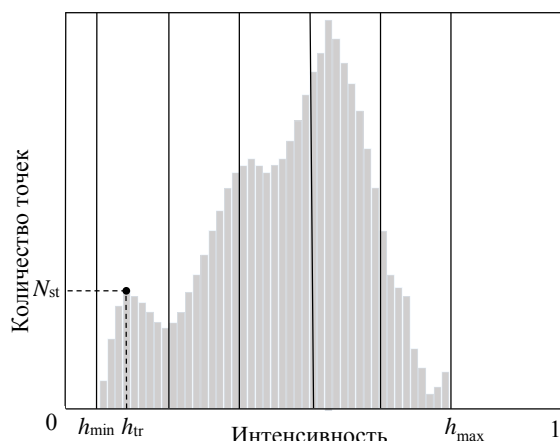


Рис. 2. Разделение гистограммы изображения  $C$  на 5 равных частей ширины  $l$

Заметим, что изображения металлических поверхностей обычно имеют серый цвет. Дефект сварного шва, как правило, имеет более темный цвет, чем поверхность изделия. Исходя из этого, начальные точки для метода НО могут быть выбраны автоматически следующим образом: для входного изображения после его предварительной обработки (фильтрация шума и нормирования значений интенсивности) строим гистограмму, которую разбиваем на 5 равных областей шириной  $l$ ; в качестве порогового значения из диапазона  $[h_{\min}, h_{\min} + l]$  выбираем интенсивность  $h_{tr}$ , соответствующую наибольшему количеству  $N_{st}$  пикселей (см. рис. 2). Набор  $\{x_i\}$ , состоящий из  $N_{st}$  точек с интенсивностью  $h_{tr}$ , будем считать набором начальных точек для метода НО.

Алгоритм 1 представляет собой формальную запись процедуры выбора начальных точек.

**Алгоритм 1.** Выбор начальных точек

**Вход:**

$A$ : входное изображение

**Пусть:**

- $B$ : отфильтрованное изображение  $A$
- $C$ : нормированное изображение  $B$  (типа *double*)
- $h$ : интенсивность цвета изображения
- $h_{\min}$ : минимальная интенсивность цвета
- $h_{\max}$ : максимальная интенсивность цвета
- $l$ : ширина разбиения гистограммы, см. (1)
- $N(h)$ : количество точек с интенсивностью  $h$
- $N_{st}$ : количество начальных точек
- $h_{tr}$ : интенсивность при наибольшем количестве пикселей для черной области гистограммы

- 1:  $B \leftarrow \text{imgaussfilt}(A)$
- 2:  $C \leftarrow \text{im2double}(B)$
- 3:  $h_{tr} \leftarrow \arg \max_{h \in [h_{\min}, h_{\min} + l]} N(h)$
- 4:  $N_{st} \leftarrow N(h_{tr})$
- 5: выбор на изображении  $C$  набора  $\{x_i\}$  из  $N_{st}$  точек с интенсивностью  $h_{tr}$

**Выход:**

- $C$ : изображение сварного шва в формате *double*
- $\{x_i\}$ : набор начальных точек,  $i = 1, 2, \dots, N_{st}$

**Сегментация наращиванием областей**

Метод НО обычно содержит два основных этапа: определение начальных точек (см. алгоритм 1), определение условий для наращивания области. Выбор критериев наращивания зависит от характеристик рассматриваемого объекта на изображении и имеющейся дополнительной информации об изображении [8, 9]. Например, этот критерий может учитывать значение интенсивности, структурные особенности или статистические параметры изображения.

В данной работе условие наращивания области определяется близостью значений интенсивности цвета пикселей, принадлежащих наращиваемой (дефектной) области, и пикселей, расположенных в непосредственной близости к этой области (т.е. соседних пикселей).

Пусть  $E_i$  – это дефектная область, порожденная начальной точкой  $x_i$  (см. предыдущий раздел).

Для дефектной области  $E_i$  можно рассчитать среднюю интенсивность ее пикселей по формуле

$$H_i = (1/|E_i|) \sum_{j=1}^{|E_i|} h_j, \quad (2)$$

где  $|E_i|$  – мощность (число элементов) области  $E_i$ ,

$h_j$  – интенсивность цвета точки  $x_j \in E_i$ .

Некоторый пиксель  $x$  из набора соседних точек дефектной области  $E_i$  будем включать в дефектную область  $E_i$ , если абсолютное значение разности  $d(x)$  между его интенсивностью  $h$  и средней интенсивностью  $H_i$  дефектной области  $E_i$  меньше критического значения  $d_{cr} = 0,15$ , т.е.

$$d(x) = |h - H_i| \leq d_{cr}. \quad (3)$$

Рисунок 3 иллюстрирует принцип работы алгоритма метода НО на примере начальной точки  $x_1$  с интенсивностью  $h_1 = 12$  (показана диагональной штриховкой на исходном изображении).

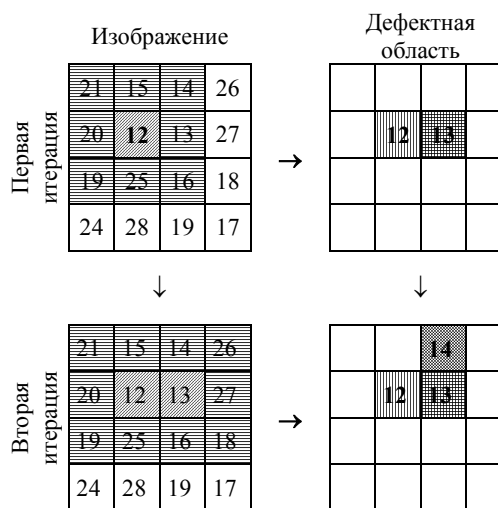


Рис. 3. Принцип работы алгоритма метода НО

Точка  $x_1$  автоматически включается в дефектную область  $E_1$ . На первой итерации соседи начальной точки  $x_1$  определяются согласно критерию 8-связности [10], т.е. в набор  $S_1$  включаются пиксели с интенсивностями  $\{21, 15, 14, 13, 16, 25, 19, 20\}$  (показаны горизонтальной штриховкой на исходном изображении). Из всех соседних пикселей точка с интенсивно-

стью 13 наиболее близка к начальной точке с интенсивностью 12; поэтому она включается в дефектную область  $E_1$  и удаляется из набора соседей  $S_1$ . На второй итерации дефектная область  $E_1$  состоит из двух пикселей с интенсивностями {12, 13} и характеризуется средней интенсивностью цвета  $(12 + 13)/2 = 12,5$ . Набор соседей  $S_1$  содержит точки с интенсивностями {21, 15, 14, 26, 27, 18, 16, 25, 19, 20}. Точка с интенсивностью 14 наиболее близка к среднему значению интенсивности дефектной области, поэтому она включается в дефектную область и удаляется из набора соседей. Описанные действия повторяются до тех пор, пока существуют соседние точки, удовлетворяющие условию (3).

В общем случае  $N_{st}$  начальных точек итоговая дефектная область  $E$  представляет собой объединение областей дефекта, полученных для каждой начальной точки  $x_i$ , т.е.

$$E = \bigcup_{i=1}^{N_{st}} E_i. \quad (4)$$

Алгоритм 2 представляет собой формальную запись процедуры наращивания дефектной области.

---

#### Алгоритм 2. Наращивание области

---

##### Вход:

$C$ : нормированное изображение  $B$  (типа *double*)  
 $\{x_i\}$ : набор начальных точек,  $i = 1, \dots, N_{st}$

##### Пусть:

$E$ : дефектная область  
 $E_i$ : дефектная область, порожденная точкой  $x_i$   
 $S_i$ : набор соседних точек дефектной области  $E_i$   
 $h_j$ : интенсивность цвета точки  $x_j$   
 $H_i$ : средняя интенсивность дефектной области  $E_i$   
 $d(x)$ : расстояние от текущей точки  $x$  до  $E_i$   
 $d_{cr}$ : критическое значение расстояния  
 $x_{near}$ : точка из  $S_i$ , наиболее близкая к  $E_i$   
 $d_{near}$ : расстояние от  $x_{near}$  до  $E_i$

```

1:  $E \leftarrow ones(size(C))$  / инициализация  $E$  белым /
2: for  $i = 1$  to  $N_{st}$  do
3:    $E_i \leftarrow ones(size(C))$  / инициализация  $E_i$  белым /
4:    $d_{near} \leftarrow 0$  / инициализация  $d_{near}$  /
5:    $E_i \leftarrow E_i \cup \{x_i\}$  / добавление  $x_i$  в  $E_i$  /
6:   while  $d_{near} \leq d_{cr}$  do
7:      $H_i \leftarrow (1/|E_i|) \sum_{j=1}^{|E_i|} h_j$ 
8:     определяем набор соседей  $S_i$  дефектной
      области  $E_i$  по критерию 8-связности
9:      $d(x) \leftarrow |h - H_i| \forall x \in S_i$  / расстояния от всех
      соседей  $x \in S_i$  до  $E_i$  /
10:     $x_{near} \leftarrow \arg \min_{x \in S_i} d(x)$ 
11:     $d_{near} \leftarrow \min\{d(x) | x \in S_i\}$ 
12:     $E_i \leftarrow E_i \cup \{x_{near}\}$  / добавляем  $x_{near}$  в  $E_i$  /
13:     $S_i \leftarrow S_i - \{x_{near}\}$  / удаляем  $x_{near}$  из  $S_i$  /
14:   end while
15:    $E \leftarrow E \cup E_i$ 
16: end for

```

##### Выход:

$E$ : дефектная область

---

#### Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов

Чтобы проверить работоспособность предложенных алгоритмов, воспользуемся несколькими изображениями поверхности сварного шва, показанными на рис. 4, *а*. Все изображения имеют размер  $200 \times 300$  пикселей. Алгоритм реализован в программном комплексе Matlab 2020b. Результаты применения предложенных алгоритмов 1 и 2 к этим изображениям показаны на рис. 4, *б*.

Для сравнения на рис. 4, *в* показаны результаты обработки изображений, полученные пороговым методом сегментации с интерактивным (т.е. полуавтоматическим) выбором пикселей, представляющих дефектную область  $E$  сварного шва [3].

Из данных рис. 4 следует, что предложенные алгоритмы 1 и 2 обеспечивают достаточно точные результаты сегментации при полностью автоматическом выборе начальных точек (см. изображения 1, 2 и 3).

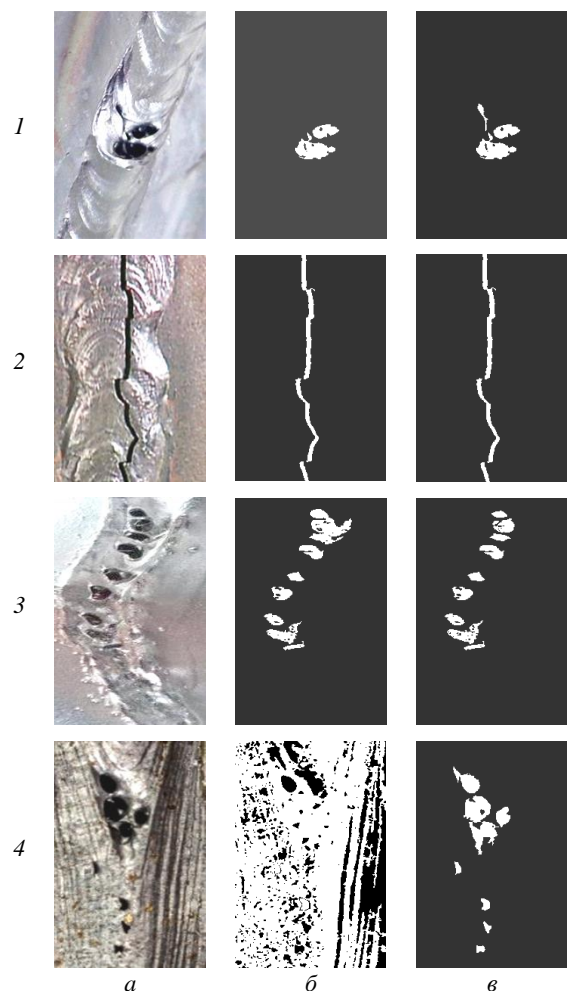


Рис. 4. Тестовые изображения и результаты сегментации: *а* – исходные изображения; *б* – сегментированные изображения с использованием предложенных алгоритмов; *в* – сегментированные изображения с использованием интерактивного порогового метода

Однако следует отметить, что если исходное изображение низкого качества, зашумлено или на по-

верхности объекта много темных точек, результаты сегментации характеризуются невысокой точностью (см. изображение 4 на рис. 4). Причиной снижения точности предложенных алгоритмов является недостаточная гибкость способа выбора начальных точек, не позволяющая обеспечить определение оптимального репрезентативного порога для дефектной области.

В ходе дальнейших исследований предполагается преодолеть этот недостаток с помощью метода комплексирования интервалов агрегированием предпочтений (IF&PA) [11]. Предварительные эксперименты показали, что этот метод позволяет обеспечить робастный выбор репрезентативных пороговых значений характеристик объектов на изображениях [12].

#### Заключение

В этой статье был предложен новый подход к сегментации изображения с использованием метода наращивания областей на основе нескольких начальных точек. В этом подходе пиксели, расположенные в самой темной области изображения, выбираются в качестве начальных точек, а область наращивается на основе среднего значения интенсивностей принадлежащих ей пикселей. Результаты проверки предложенного подхода на реальных фотоизображениях показывают, что он позволяет обнаруживать разные типы дефектов сварного шва с достаточно высокой точностью при условии высокого качества исходных изображений.

#### Литература

1. Li Y. Visual inspection of weld surface quality / Y. Li, M. Hu, T. Wang // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems Preprint. – 2020. – P. 1–10.
2. An image segmentation method using fuzzy-based threshold / F. Wong, R. Nagarajan, S. Yaacob, A. Chekima, N.E. Belkhamza // Proceedings of the Sixth International Symposium on Signal Processing and its Applications. – 2001. – Vol. 1. – P. 144–147.
3. Муравьев С.В. Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков / С.В. Муравьев, Е.Ю. Погадаева // Дефектоскопия. – 2020. – № 3. – С. 49–57.

4. Seeded region growing: an extensive and comparative study / J. Fan, G. Zeng, M. Body, M.S. Hacid // Pattern recognition letters. – 2005. – Vol. 26, No. 8. – P. 1139–1156.

5. Shih F.Y. Automatic seeded region growing for color image segmentation / F.Y. Shih, S. Cheng // Image and Vision Computing. – 2005. – Vol. 23, No. 10. – P. 877–886.

6. Ibrahim H. Brightness preserving dynamic histogram equalization for image contrast enhancement / H. Ibrahim, N.S.P. Kong // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2007. – Vol. 53, No. 4. – P. 1752–1758.

7. Gibson A.S. Exposure and Understanding the Histogram. – Berkeley: Peachpit Press, 2014. – 86 p.

8. Jain P.K. An adaptive single seed based region growing algorithm for color image segmentation / P.K. Jain, S. Susan // Annual IEEE India Conference. – 2013. – P. 1–6.

9. Automatic segmentation of meningioma from non-contrasted brain MRI integrating fuzzy clustering and region growing / T.M. Hsieh, Y.M. Liu, C.C. Liao, F. Xiao, I.J. Chiang, J.M. Wong // BMC medical informatics and decision making. – 2011. – Vol. 11, No. 1. – P. 1–12.

10. El-Sayed M.A. Edges detection based on Renyi entropy with split/merge // Computer Engineering and Intelligent Systems (CEIS). – 2012. – Vol. 3, No. 9. – P. 32–41.

11. Muravyov S.V. Analysis of heteroscedastic measurement data by the self-refining method of interval fusion with preference aggregation – IF&PA / S.V. Muravyov, L.I. Khudonogova, M.D. Ho // Measurement. – 2021. – Vol. 183. – P. 109851.

12. Muravyov S.V. Recognition Ability of Interval Fusion with Preference Aggregation in Weld Defects Images Analysis / S.V. Muravyov, E.Yu. Pogadaeva // 17th IMEKO TC10 Conference «Global Trends in Testing, Diagnostics & Inspection for 2030», Dubrovnik, Croatia, October 19–22, 2020. – P. 271–276.

#### Нгуен Дык Кыонг

Аспирант отд. автоматизации и робототехники НИ ТПУ  
Эл. почта: nguyenduccongh123@gmail.com

#### Муравьев Сергей Васильевич

Д-р техн. наук, проф. отд. автоматизации и робототехники НИ ТПУ  
Эл. почта: muravyov@tpu.ru

С.В. Коновалов, Г.А. Волокитин, Р.С. Кульшин

## Разработка высоконагруженного цифрового реестра учета воинских захоронений

Рассматривается разработка высоконагруженного цифрового реестра учета воинских захоронений. С помощью цифрового реестра можно оперативно установить личность без вести пропавших солдат, а также военнослужащего и место его захоронения. С помощью панели администратора предоставляется возможность актуализировать списки солдат, пропавших без вести, и заполнить всю необходимую информацию, а также прикрепить документы и фотографии. Представленные в Реестре алфавитные списки являются результатом совместной архивно-исследовательской работы сотрудников Представительства с членами молодежных военно-исторических поисковых объединений, а также с российскими активистами.

**Ключевые слова:** цифровой реестр, панель администратора, мобильное приложение, веб-интерфейс, базы данных, обработка информации.

На сегодняшний день не существует единого цифрового реестра учета воинских захоронений. Все существующие данные находятся в архивах на бумажных носителях или представлены локальными региональными базами данных, которые собирают различные поисковые организации. Из-за этого процесс идентификации каждого пропавшего без вести солдата является долгим и часто недостоверным.

Для решения данной проблемы разработана информационная система, являющаяся Цифровым реестром учета воинских захоронений.

Для сбора всех данных, необходимых для функционирования информационной системы, были проведены переговоры с ведущими военно-поисковыми организациями и получен доступ к базе данных с информацией о 5 млн. пропавших без вести солдат.

Разрабатываемая информационная система представляет собой сервер с базой данных, панель администратора и клиентскую часть.

### Серверная часть информационной системы

В начале разработки серверной части была спроектирована и нормализована база данных. Из полученных разнородных данных были выделены следующие сущности:

- 1) страна;
- 2) регион;
- 3) исторический период;
- 4) захоронение;
- 5) солдат;
- 6) пропавший солдат.

Изначально в базу данных были перенесены сведения о пропавших без вести солдат. Данные о личностях установленных бойцов загружаются на сервер лицами, ответственными за военно-мемориальную работу в конкретном регионе. Данные предоставляются в формате CSV (Comma-Separated-Values) [1].

Для взаимодействия с базой данных был разработан API на языке программирования PHP с использованием фреймворка Laravel [2].

### Админ-панель информационной системы

Веб-интерфейс разработан с помощью фреймворка Bootstrap [3]. Функционал панели администратора разделен на 2 роли:

- 1) роль главного администратора;
- 2) роль представителя региона.

Главный администратор имеет возможность создавать аккаунты для представителей регионов. Такой способ создания пользователей системы необходим для предотвращения получения доступа к системе с целью внесения недостоверных данных и избежания судебных разбирательств. Главный администратор ответствен за создание регионов, стран, временных периодов и имеет для этого весь необходимый функционал. Функционал создания временных периодов представлен на рис. 1.

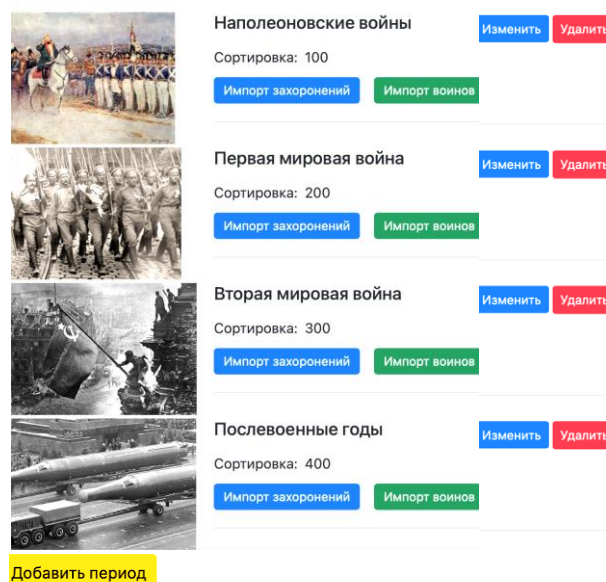


Рис. 1. Функционал создания временных периодов

Главный администратор имеет возможность загружать и выгружать данные об установленных войнах и местах захоронений для всех регионов. После загрузки данных о войнах представителями регионов система сопоставляет полученные данные со списком пропавших без вести бойцов. В случае совпадения система присылает главному администратору уведомление о наличии совпадения. В таком случае администратор должен принять решение об установлении личности бойца и об изменении его статуса на найденного.

В системе предусмотрена поисковая панель по найденным солдатам для изменения их данных в слу-

чае необходимости. Поисковая панель представлена на рис. 2.

Главный администратор может добавлять, изменять и удалять сведения о захоронении. Также у него

присутствует функционал фильтрации захоронений. Функционал управлением захоронений представлен на рис. 3.

**Воины**

Фильтр  Страна  Регион

<input type="checkbox"/>	Страна	Регион	ФИО	Звание	Дата смерти	Захоронение	РБД	Доп. инфо
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Андарев	Прапорщик, сотник	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Анзбулов	Прапорщик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Араужев	Прапорщик Лейб Гвардии	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Белов Михаил	Подпоручик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	Среднечешский край	Берклей де Толли Эдвард	старший лейтенант	31.08.1813	Сланы/Slaný	2-3-2N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Булахов	Поручик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Вагин	Подпоручик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Вент	Прапорщик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Гаврилов	Поручик	17.12.1904	Жижков/Žižkov	1-3-1N	данных нет

Рис. 2. Поисковая панель

**Захоронения**

Фильтр  Страна  Регион

<input type="checkbox"/>	Страна	Регион	Название	РБД
<input type="checkbox"/>	Чехия	КРАЙ ПРАГА	Жижков/Žižkov	1-3-1N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Среднечешский край	Сланы/Slaný	2-3-2N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Устецкий край	Цитолибы/Citoliby	6-4-3N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Устецкий край	Хлумец/Chlumec	6-7-4N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Устецкий край	Пршестанов/Přestavov	6-7-5N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Краловеградский край	Тршебноушесев/Třebnouševs	8-2-6N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Пардубицкий край	Евичко/Jevíčko	9-3-7N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Пардубицкий край	Добржигов/Dobříkov	9-4-8N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Оломоуцкий край	Длоуга-Лоучка/Dlouhá Loučka	10-2-9N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Оломоуцкий край	Врбатки/Vrbátky	10-3-10N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Оломоуцкий край	Веселичко/Veselíčko	10-4-11N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Южноморавский край	Тварожна/Tvarožná	12-3-12N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Южноморавский край	Праце/Prace	12-3-13N
<input type="checkbox"/>	Чехия	Злинский край	Быстрице-под-Гостинем/Bystřice pod Hostýnem	13-1-14N

Рис. 3. Функционал управления захоронениями

Функционал представителя региона отличается от главного администратора тем, что представитель не может создавать новых пользователей и загружать данные только для региона, за который он ответствен.

**Мобильное приложение информационной системы**

Мобильное приложение позволяет конечному пользователю просматривать данные о установленных бойцах. Мобильное приложение было разработано на кроссплатформенном фреймворке Flutter с

использованием языка программирования Dart [4]. Использование данной технологии при разработке мобильного приложения позволило сократить время разработки и избежать больших финансовых затрат на реализацию проекта.

Ряд главных экранов позволяет пользователю выбрать страну, регион, исторический период для дальнейшего просмотра мест захоронений и установленных бойцов. Установленные бойцы выводятся списком карточек. На рис. 4 представлен экран со списком бойцов.





Рис. 4. Экран со списком карточек установленных бойцов

Каждая карточка позволяет просмотреть фотографии места захоронения бойца и его документы.

#### Заключение

Данные, приведённые в Реестре, основаны, прежде всего, на донесениях о безвозвратных потерях, на сведениях о военнопленных и документах госпиталей и медсанбатов, а также на источниках

официального происхождения из российских архивов, книг памяти, метрических книг и содержат персональную информацию о воинах периодов Наполеоновских войн, Первой мировой войны, Второй мировой войны и послевоенного периода.

Представленные в Реестре алфавитные списки являются результатом совместной архивно-исследовательской работы сотрудников Представительства с членами молодежных военно-исторических поисковых объединений, а также с российскими активистами.

На текущий момент проект поддержан организациями: Сбербанк; Альфа-Групп; Международный культурный институт «Ключ» в Чехии; АНО «Родина».

#### Литература

1. Официальный стандарт RFC. – URL: <https://data-tracker.ietf.org/doc/html/rfc4180> (дата обращения: 24.09.2021).
2. Официальная документация фреймворка Laravel. – URL: <https://laravel.com> (дата обращения: 24.09.2021).
3. Официальная документация фреймворка Bootstrap. – URL: <https://getbootstrap.com> (дата обращения: 24.09.2021).
4. Официальная документация языка программирования Dart. – URL: <https://dart.dev> (дата обращения: 24.09.2021).

#### Коновалов Степан Вячеславович

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
 Эл. почта: [stepkon1999@mail.ru](mailto:stepkon1999@mail.ru)

#### Волокитин Геннадий Александрович

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
 Эл. почта: [volokitin@eticon.ru](mailto:volokitin@eticon.ru)

#### Кульшин Роман Сергеевич

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
 Эл. почта: [kulshin@eticon.ru](mailto:kulshin@eticon.ru)

УДК 004.415.2

С.В. Коновалов, Г.А. Волокитин, Р.С. Кульшин

## Разработка чат-бота для платформенного рекламного кабинета

Разработка чат-бота для платформенного рекламного кабинета позволяет упростить процесс создания и публикации рекламных интеграций в мессенджере телеграмм. Чат-бот собирает данные о конверсии пользователей и выдает рекомендации для проведения удачных рекламных кампаний.

**Ключевые слова:** база данных, чат-бот, рекламная интеграция, телеграмм.

Мессенджер телеграмм является одним из самых популярных мессенджеров в мире, однако в отличие от других мессенджеров в данном нет какой-либо встроенной площадки для продвижения каналов с аудиторией и заработка на рекламе. Вся продажа рекламы происходит путем личного кооперирования и общения владельцев каналов. Отсутствуют какая-либо статистика и информация о конверсии для дальнейшего построения рекламной компании.

Для решения данной проблемы разработан телеграмм-бот, который автоматизирует процесс рекламы, выдает рекомендации для выбора канала, а также предоставляет полную статистику по рекламной итерации. Телеграмм-бот реализован на языке программирования Python 3.9 с использованием библиотеки python-telegram-bot [1].

### База данных информационной системы и API

Для хранения всей необходимой информации была разработана база данных на PostgreSQL и выделены следующие сущности:

- 1) канал;
- 2) рекламодатель;
- 3) владелец канала;
- 4) объявление;
- 5) категория;
- 6) транзакция.

Для удобного взаимодействия с базой данных был написан API с использованием языка программирования Python 3.9 и фреймворка Django 3.0 [2].

### Процесс регистрации в чат-боте

Для того чтобы начать пользоваться ботом, пользователю необходимо ввести команду /start, после чего ему предлагается выбрать роли рекламодателя или же владельца канала. После выбора роли пользователю предлагается заполнить информацию о своем канале и предпочитаемые категории. Для того чтобы телеграмм-бот смог собирать информацию о конверсии, пользователь должен добавить бот в свой канал путем использования команды /add\_bot\_from\_channel и выдать права для публикации сообщений. Если пользователь успешно прошел все этапы регистрации, то ему становится доступен рабочий кабинет.

### Рабочий кабинет рекламодателя

В рабочем кабинете рекламодателя пользователю доступны следующие функции:

- 1) создание рекламного объявления;
- 2) просмотр текущей рекламной кампании по каждому объявлению;
- 3) кошелек;
- 4) каналы;
- 5) уведомления.

На рис. 1 изображен кабинет рекламодателя.

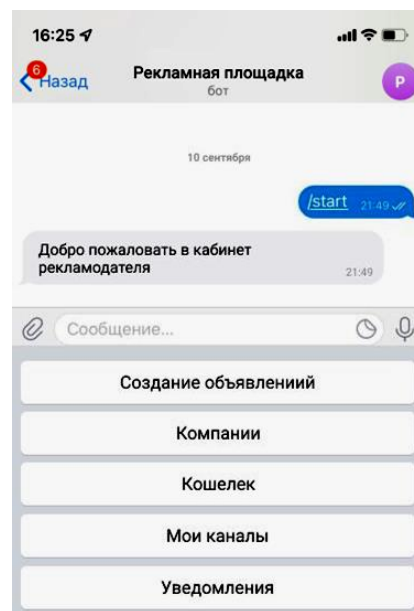


Рис. 1. Кабинет рекламодателя

Создание рекламного объявления позволяет пользователю создать рекламное объявление, добавив заголовок текст и картинку объявления, после чего рекламодатель выбирает категорию объявления. После создания объявления система, основываясь на введенных категориях, предлагает пользователю каналы, просмотрев информацию о которых, пользователь может отправить предложение о рекламной интеграции. Если владелец канала принимает предложение об интеграции, то рекламодателю необходимо оплатить стоимость интеграции, и бот опубликует рекламное сообщение.

Просмотр текущей рекламной кампании предоставляет пользователю информацию о действующих рекламных объявлениях, позволяет посмотреть количество переходов с каждого канала и количество подписок. На данных, получаемых о переходах и подписках, система создает рекомендации, на основе которых пользователь может скорректировать список каналов, в которых публикуется рекламное объявление.

Кошелек позволяет просмотреть текущий баланс пользователя, а также при необходимости внести или вывести средства со счета.

Пункт «каналы» позволяет просматривать каналы пользователя, в продвижении которых он нуждается. Каналы можно добавлять, удалять, редактировать и изменять их категории.

Раздел уведомлений позволяет пользователю просматривать события, которые происходят в боте. Этими событиями являются информация о зачислении и списании средств со счета и информация о принятых или отвергнутых рекламных интеграциях.

#### Рабочий кабинет владельца канала

Рабочий кабинет владельца канала содержит в себе следующий функционал:

- 1) предложения;
- 2) мои каналы;
- 3) кошелек;
- 4) уведомления.

Пункт «предложения» позволяет пользователю просматривать входящие предложения о рекламной интеграции, принимать или же отклонять данные предложения. Если пользователь принимает предложение о рекламной интеграции [3], то чат-бот публикует объявление в выбранном рекламодателем канале.

Пункт «мои каналы» содержит в себе информацию о каналах пользователя, позволяет редактировать список каналов и их категории, а также просматривать статистику по каждому из каналов.

Пункт «кошелек» позволяет просматривать баланс пользователя, а также выводить средства со счета.

Пункт «уведомления» содержит в себе информацию о событиях внесения или снятия денежных средств, а также информацию о публикациях рекламных сообщений на каналах. На рис. 2 изображен кабинет владельца канала.

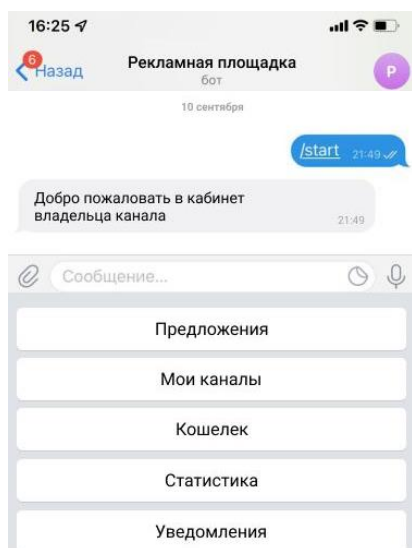


Рис. 2. Кабинет владельца канала

#### Процесс сбора статистики

Для того чтобы чат-бот мог собирать статистику об эффективности рекламной кампании, к каждому рекламному объявлению прикрепляются кнопки с ссылкой на рекламируемый канал. После нажатия подписчиком канала на данную кнопку происходит перенаправление на рекламируемый канал и собирается вся доступная информация о пользователе. На основе этих данных и данных о каналах происходит формирование статистики по каждой рекламной кампании.

#### Заключение

На текущий момент разрабатываемая система находится на этапе тестирования. Также ведутся переговоры с владельцами телеграмм-каналов для их привлечения в систему.

При дальнейшей разработке системы планируется создать функционал для автоматической публикации рекламных интеграций без участия владельцев каналов. Внедрение данного функционала позволит автоматизировать процесс рекламных кампаний, освободив пользователей системы от изнурительного процесса отправки и принятия предложения о интеграции.

#### Литература

1. Официальная документация python-telegram-bot. – URL: <https://python-telegram-bot.readthedocs.io/en/stable/> (дата обращения: 24.09.2021).
2. Официальная документация фреймворка Django. – URL: <https://www.djangoproject.com> (дата обращения: 24.09.2021).
3. Способы рекламной интеграции. – URL: <https://konoden.ru/sposoby-reklamnoj-integracii/> (дата обращения: 24.09.2021).

#### Коновалов Степан Вячеславович

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: stepkon1999@mail.ru

#### Волокитин Геннадий Александрович

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: volokitin@eticon.ru

#### Кульшин Роман Сергеевич

Студент каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: kulshin@eticon.ru

М.А. Беляева, Р.А. Сарибекян, А.С. Прокудин, А.В. Сорокиков, Н.Ф. Зимин

## Анализ зависимости содержания CO<sub>2</sub> от температуры в течение года в атмосфере Земли по данным спутника GOAST

Даны краткое описание проекта и его работы, а также анализ зависимости содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере от температуры в течение одного года по всей планете.

**Ключевые слова:** Земля, атмосфера, CO<sub>2</sub>.

Атмосфера Земли – это газовая оболочка нашей планеты, состояние которой определяет погоду и климат на поверхности Земли. Одним из способов свидетельствования об уровне экологии определенного участка Земли может быть значение содержания углекислого газа в атмосфере над этим участком земного шара. Данные об этом крайне важны и находятся в свободном доступе.

Изменение содержания углекислого газа в атмосфере в течение года имеют четко выраженный характер. Помимо антропогенных и природных воздействий, на содержание CO<sub>2</sub> также может оказывать влияние и температура атмосферы.

### Цель исследования

Цель нашего исследования – определить степень и характер зависимости между содержанием углекислого газа и температурой на примере одного года по всему земному шару. Для рассмотрения данных атмосфера была разделена на северное и южное полушария.

### Используемые средства анализа

Для подобного анализа необходима среда, которой стал программный продукт, разработанный нами в рамках группового проектного обучения. Принцип работы этого продукта заключается в следующем:

пользователь через интерфейс-сайт вводит в форму необходимые данные (значения широты, долготы территории и диапазон времени). Затем происходит подключение к базе данных, в которой хранятся уже загруженные и обработанные данные со спутника уровня L2 (нами будут использоваться данные только с GOSAT, однако в настоящее время возможно подключение к GOSAT-2, OCO-2 и OCO-3). Данные для выбранной территории и времени поступают на разрабатываемый нами сайт. Заметим, что определенная часть данных может присутствовать в хранилище и тогда поступают только новые данные или недостающие в программе. Сами результаты запроса пользователя отображаются в виде графиков в палитре, где синий указывает на меньшую концентрацию, а красный на большую. Кроме этого, строятся в той же градации цветов 2D-карты пространственного распределения содержания выбранных газов. Для разработки программы использовалась связка из следующих элементов: СУБД MySQL, которая позволяет обрабатывать множественное подключение пользователей, Python 3 и фреймворк Flask, который подходит для создания небольших сайтов. Подробнее можно рассмотреть на рис. 1.

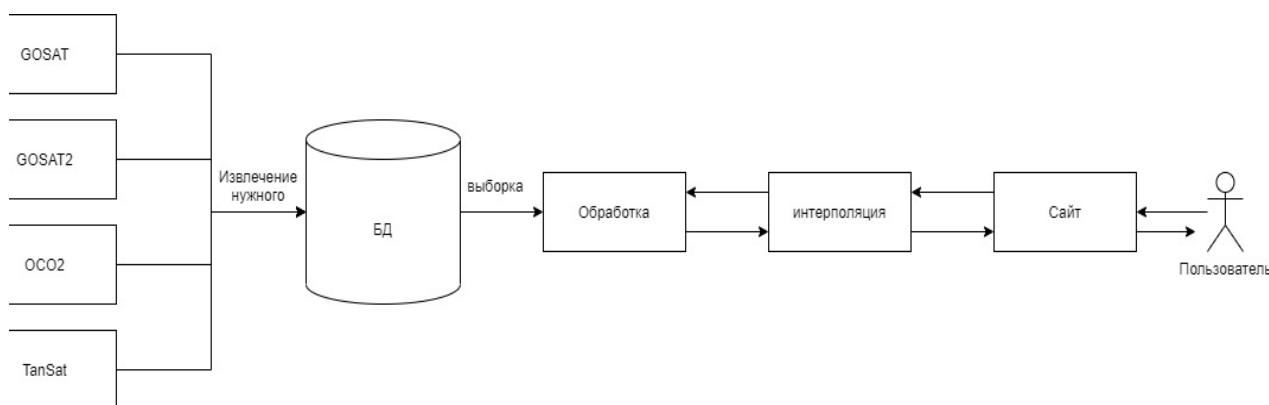


Рис. 1. Схема работы проекта

### Данные для обработки

Данные GOSAT уровня L2 изначально представляют собой архив файлов формата HDF5. В среднем цикл работы по сборам данных спутника занимает около 3 дней, а количество измеренных точек значений около 20 тыс. Для проведения необходимого анализа из данных GOSAT уровня L2 извлекалась информация о координатах и времени измерения, содержании углекислого газа и температуре в кельвинах [1].

Для анализа мы выбрали 2010 г. и в общей сложности получили 216 точек со значениями содержания CO<sub>2</sub> для всего земного шара. Для северного полушария их 108 и для южного – 108.

### Анализ данных

По полученным данным были построены точечные графики (оранжевым цветом) для каждого из полушарий для того, чтобы проследить общую тенденцию (синий цвет) и выявить наличие аномалий, в случае их обнаружения. На рис. 2 и 3 представлены гра-

фики зависимости содержания  $\text{CO}_2$  от температуры для северного и южного полушарий соответственно.

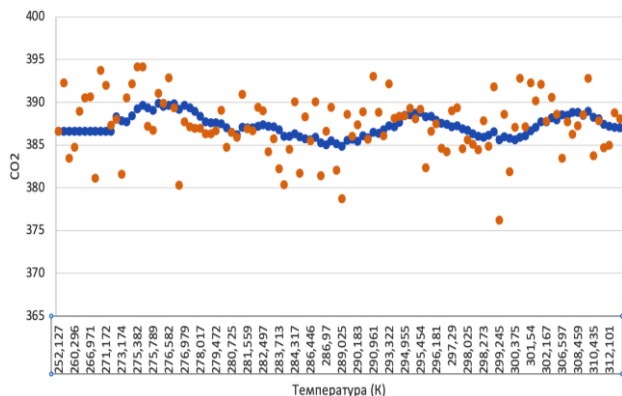


Рис. 2. Зависимость содержания  $\text{CO}_2$  от температуры в северном полушарии за 2010 г.

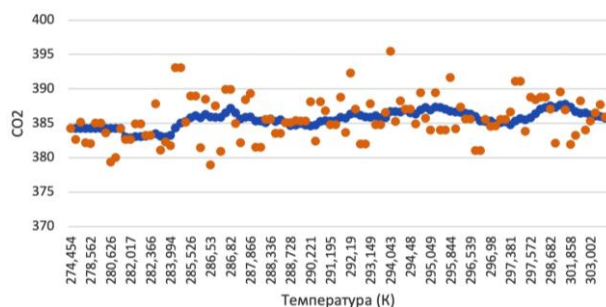


Рис. 3. Зависимость содержания  $\text{CO}_2$  от температуры в южном полушарии за 2010 г.

На первом графике мы видим, что с наступлением зимних месяцев температура закономерно понижается, а углекислый газ повышается. В ситуации со вторым графиком мы можем наблюдать, что в летний период года у них большое содержание углекислого газа, это связано с тем, что во всех странах южного полушария климатическое лето не совпадает с календарным, так как пока одна часть нашей планеты получает больше тепла от Солнца, в другой части царствует зима. Однако при повышении температуры содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере снижается в северном полушарии. Объяснением этому закономерному изменению количества  $\text{CO}_2$  в атмосфере может быть активность растений посредством фотосинтеза. Фотосинтез — это процесс преобразования атмосферного углерода в форму молекул  $\text{CO}_2$  в зеленую массу растений. Данный процесс происходит активней всего в теплое время года [2].

Но в случае с южным полушарием ситуация немного иная, и содержание наоборот понемногу увеличивается. Объяснением этому может быть большое количество пустынь, где крайне мало растений способных перерабатывать  $\text{CO}_2$ , а также недостаточно высокий уровень развития стран, который бы позволил контролировать выбросы, как, к примеру, в Японии.

## Вывод

Итак, можно сделать вывод о том, что в северном полушарии зависимость содержания углекислого газа от температуры обратно пропорциональная. То есть чем ниже температура, тем выше содержание газа. Это может быть связано с тем, что в зимнее время люди начинают активно использовать отопительные системы, тем самым выбрасывая огромное количество углекислого газа в атмосферу. В летнее же время, когда этот процесс сходит к минимуму, уровень углекислого газа падает.

Для южного же полушария ситуация обратна, и с повышением температуры увеличивается и содержание  $\text{CO}_2$ . Подобное возможно из-за слабого развития систем контроля выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу планеты.

В то же время могут наблюдаться некоторые аномалии концентрации  $\text{CO}_2$  при повышенной температуре, это связано с тем, что растения не только увеличили его поглощение, но и выделение в процессе дыхания. Данный факт объясняется тем, что у фотосинтеза есть оптимальный температурный диапазон, за пределами которого его эффективность значительно снижается [3, 4].

## Литература

1. Данные о технических особенностях спутников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/a> (дата обращения: 14.09.2021).
2. Реакция растений на рост концентрации углекислого газа в атмосфере // Живые и биокосные системы. – Вып. № 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [jbks.ru](http://jbks.ru) (дата обращения: 18.09.2021).
3. Повышение температуры заставило растения поглощать больше углекислого газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2017/06/06/co2fixation> (дата обращения: 18.09.2021).
4. Немов Л. Об изменении климата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2017/06/06/co2fixation> (дата обращения: 18.09.2021).

**Беляева Мария Алексеевна**  
Студентка каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [pandorabelyeva@gmail.com](mailto:pandorabelyeva@gmail.com)

**Сарибекян Рудольф Арманович**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [rudolf.saribekyan@mail.ru](mailto:rudolf.saribekyan@mail.ru)

**Прокудин Андрей Сергеевич**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [aprokopsk@mail.ru](mailto:aprokopsk@mail.ru)

**Сорокиков Алексей Викторович**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [alekx40@yandex.ru](mailto:alekx40@yandex.ru)

**Зимин Никита Федорович**  
Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: [amaljaphar@gmail.com](mailto:amaljaphar@gmail.com)

УДК 004.04

Д.С. Злодева

## Исследование методов кластерного анализа и оценка качества кластеризации на примере данных клиентов банков

Кластерный анализ является инструментом разбиения множества объектов таким образом, чтобы похожие объекты находились в одном кластере, а объекты различных кластеров существенно различались. Существенное отличие кластеризации от классификации заключается в том, что кластеризация – процесс обучения без учителя, так как какой-либо известной информации не предоставляется. Проблемой кластеризации является оценка её качества, так как кластеризация разными методами на выходе получает разные кластерные структуры. Индексы оценки качества кластеризации учитывают компактность и отделимость кластеров, однако, данная область изучена недостаточно. Кластеризация в маркетинговых целях очень популярна. В качестве входных данных может быть использована информация о клиентах организаций, которые нацелены на предоставление персональных предложений для разных категорий клиентов.

**Ключевые слова:** кластеризация, кластер, объект, критерии оценки качества кластеризации, банковское учреждение, клиенты.

В ходе осуществления деятельности предприятий и учреждений в разных сферах общества растет количество информации. В связи с этим остро встает вопрос обработки и структурирования полученных данных. Не вся исходная информация пригодна для анализа и применения, поэтому возникает необходимость первоначальной обработки данных.

Рассмотрение клиентского потока необходимо начинать с изучения клиентов, ограниченных разными целями и бюджетами. Рассмотрение однородной популяции не принесёт результатов [1].

Главной проблемой в задачах кластеризации является качество получаемых разбиений, которое определяется через критерии. Применение критериев изучено недостаточно подробно и требует дополнительного анализа [2].

### Методы кластеризации

Методов кластеризации существует большое количество. Выбор конкретного зависит от желаемого результата [3].

Методы кластерного анализа можно разделить на иерархические и неиерархические.

Иерархические алгоритмы попарно измеряют расстояние между объектами, объединяют (либо дробят) объекты в группы. Древовидная структура является результатом того, что соседние объекты похожи друг на друга [4].

Метод Варда относится к алгомеративной иерархической кластеризации, т.е. объединяет объекты снизу вверх. Каждый объект рассматривается как отдельный кластер, а на каждом шаге два наиболее похожих объекта объединяются в один кластер. Метод сводит к минимуму среднюю сумму квадратов евклидовых расстояний от объектов до центров (наименьший прирост дисперсии внутри нового кластера).

Неиерархические алгоритмы в процессе деления формируют кластеры до тех пор, пока не будет выполнено условие останова [5, 6].

Алгоритм  $k$ -средних требует задания фиксированного числа кластеров, которые представляются в виде центров. Центры кластеров пересчитываются на каждом шаге. В результате получается кластерная структура с заданным количеством кластеров.

### Метод определения количества кластеров

Недостатком рассмотренных алгоритмов является необходимость задания числа кластеров до начала кластеризации. При обработке ранее изученных данных возникает проблема определения числа кластеров для запуска алгоритма. С этой целью принято применять методы определения количества кластеров. Одним из таких является метод локтя.

Суть метода заключается в том, что общая сумма квадратов внутри кластера измеряет компактность кластеризации, которая должна быть как можно меньше (1):

$$\min\left(\sum_{k=1}^k W(C_k)\right), \quad (1)$$

где  $C_k$  – кластер  $k$ ;  $W(C_k)$  – вариация внутри кластера.

### Критерии оценки качества

К критериям оценки качества можно отнести средние межкластерное и внутрикластерное расстояния, а также суммы квадратов межкластерных и внутрикластерных расстояний [7].

Devies-Bouldin (DB) index измеряет сходство между кластерами на основе дисперсии кластера и меры различия между двумя кластерами [8] (2):

$$DB = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c R_i, \quad (2)$$

где  $R_{ij} = \frac{S_i + S_j}{d_{ij}}$  – величина схожести;

$S = \left\{ \frac{1}{n_{c_i}} \sum_{x \in c_i} \|x - v_i\|^q \right\}^{1/q}$  – мера разброса внутри

кластера;  $d_{ij} = \left\{ \sum_{k=1}^d (v_i^k - v_j^k)^p \right\}^{1/p}$  – мера различия

между кластерами;  $c$  – число кластеров;  $v_i^k$  – центр кластера.

Так как акцентируется внимание на том, что кластеры в структуре значительно отличаются друг от

друга, то наилучшей будет структура с минимальным значением индекса [10].

*Индекс Данна* (Dunn index) сравнивает межкластерное расстояние, которое рассчитывается между двумя ближайшими элементами, с диаметром кластера (3):

$$D = \min_{i,j \in \{1..c\}, i \neq j} \left\{ \frac{d(c_i, c_j)}{\max_{k \in \{1..c\}} \text{diam}(c_k)} \right\}, \quad (3)$$

где  $d$  – расстояние между кластерами;  $\text{diam}(c_k)$  – диаметр кластера (максимальное расстояние между элементами одного кластера).

Считается, если диаметр кластера мал по сравнению с межкластерным расстоянием, то кластеры полученной структуры достаточно компактны и отделены, следовательно, чем больше значение индекса, тем лучше кластеризация.

*Индекс Се-Бени* (Xie-Beni) относится к категории индексов, включающих значения объекта и набора данных. Рассматривается нечеткое разбиение данных с центрами каждого кластера и принадлежность точки  $j$  к кластеру  $i$ . Нечеткое отклонение  $D$  от кластера определяется как расстояние  $d_{ij}$  между объектом и центром кластера, взвешенное нечеткой принадлежностью  $U_{ij}$ , определённой ранее (4):

$$d_{ij} = U_{ij} \|x_i - v_i\|. \quad (4)$$

Индекс Се-Бени определяется по формуле (5):

$$XB = \frac{\pi}{N * d_{\min}}, \quad (5)$$

где  $\pi = \frac{\sigma_i}{n_i}$  – компактность кластера;  $\sigma$  – полная вариация набора данных (сумма вариаций всех кластеров);  $n_i$  – количество точек в кластере.

Небольшое значение ожидается для компактных и хорошо разделённых кластеров.

*SD-индекс.* Оценка качества кластеризации сводится к определению дисперсии на множестве объектов и внутри кластера (SD\_Dist и SD\_Scatt соответственно) (6), (7):

$$S_{catt} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \frac{\|\sigma_{v_i}\|}{\|\sigma_x\|}, \quad (6)$$

$$\text{dist} = \frac{\max_{i,j \in \{1..c\}} (\|v_j - v_i\|)}{\min_{i,j \in \{1..c\}} (\|v_j - v_i\|)} \sum_{i=1}^c \left( \sum_{i=1, i \neq j}^c \|v_j - v_i\| \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{v_i}$  – дисперсия внутри кластера,  $\sigma_x$  – дисперсия на множестве,  $v$  – центр кластера.

Найденные значения суммируются и представляют результат оценки разбиения: низкое значение – лучшее разбиение [9].

Коэффициент силуэта показывает, насколько хорошо распределена каждая отдельная точка. Если значение индекса близко к 0, то точка находится в точке перегиба между двумя кластерами, значение 1 – точка хорошо назначена и может быть интерпре-

тирована как принадлежащая к «соответствующему» кластеру (8):

$$swc = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{x_j}, \quad (8)$$

где  $S_{x_j} = \frac{b_{p_j} - a_{p_j}}{\max(b_{p_j}, a_{p_j})}$  – «силуэт» элемента;  $a_{p_j}$  – расстояние от объекта до других объектов этого же кластера;  $b_{p_j}$  – минимальное среднее расстояние до объектов другого кластера.

Лучшее разбиение характеризуется минимальным значением, что достигается минимальным расстоянием внутри кластера и максимальным расстоянием между элементами соседних кластеров.

### Эксперимент

Банковская сфера является одной из самых клиент-ориентированных. Интеллектуальная сегментация клиентов позволит организации эффективно распределить маркетинговые ресурсы и выявить категории клиентов.

Имеются данные клиентов, полученные с помощью маркетинговых кампаний (телефонных звонков) банковского учреждения.

Количество записей 1000. Количество характеристик 12.

По логике банков клиентов следует делить на 2 категории: подпишут договор срочного депозита или нет. Поэтому первоначально был произведен кластерный анализ, в ходе которого данные были разбиты на два кластера.

В результате кластеризации совпадение с выходным значением составило 76,2%, Варда – 77,6%.

Далее для разбиения на два кластера были получены результаты индексов оценки качества кластеризации. Жирным выделено лучшее значение (табл. 1). Можно отметить, что лучшим был признан метод Варда. Однако в некоторых случаях результаты очень близкие.

Таблица 1

### Оценка качества кластеризации: 2 кластера

Индексы	$k$ -средних	Варда
Devies-Bouldin	1,5691	<b>1,5111</b>
Dunn	<b>0,1163</b>	0,1021
Xie-Beni	<b>3,1546</b>	4,1882
SD	1,5649	<b>1,5521</b>
Silhouette	0,2616	<b>0,2721</b>

По полученным результатам нельзя однозначно выделить метод, который разбил клиентов лучшим образом, поэтому на втором этапе с помощью методов локтя было определено необходимое для данного набора данных количество кластеров (рис. 1).

На графике вычисленных значений по методу локтя можно выделить точку перегиба для числа кластеров, равную трём. Дальнейшее вычисление компактности кластеров будет снижаться, но не с такой скоростью, следовательно, количество вычислений

будет увеличиваться быстрее, чем компактность внутри кластера уменьшаться.

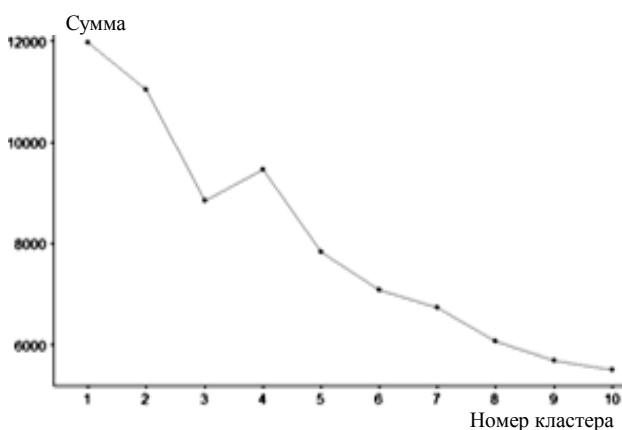


Рис. 1. Определение количества кластеров методом локтя

В результате кластеризации по методу Варда количество объектов в кластерах оказалось 700, 163 и 136, по методу  $k$ -средних – 546, 302 и 151.

Далее для разбиения на три кластера были получены результаты индексов оценки качества кластеризации (табл. 2). В данном случае индексы оценки качества кластеризации отдают предпочтение методу  $k$ -средних.

Таблица 2

**Оценка качества кластеризации: 3 кластера**

	$k$ -средних	Варда
Devies-Bouldin	<b>1,3718</b>	1,7154
Dunn	<b>0,1163</b>	0,1021
Xie Beni	<b>2,8668</b>	3,8302
SD	<b>1,4311</b>	1,5726
Silhouette	<b>0,3049</b>	0,2273

Далее были отдельно выделены влияющие на кластеризацию характеристики и была проведена кластеризация только по этим показателям. Для отбора влияющих характеристик был посчитан процент разницы средних значений для двух и трёх кластеров. В результате выбранные характеристики были следующие: Balance: среднегодовой баланс, в евро (числовой); Campaign: количество контактов, проведенных в ходе этой кампании и для этого клиента; Pdays: количество дней, которое прошло после того, как клиент последний раз связывался с предыдущей кампанией; Previous: количество контактов выполнено до этой кампании и для этого клиента; Routcome: результаты предыдущих маркетинговых кампаний (неизвестно, другие, неудача, успех).

Далее была проведена кластеризация для выбранных методов и посчитаны индексы (табл. 3).

Таблица 3

**Оценка качества кластеризации объектов с выбранными признаками: 3 кластера**

Индексы	2 $k$ -средних	2 Варда	3 $k$ -средних	3 Варда
Devies-Bouldin	0,9596	1,2301	1,1713	<b>0,9563</b>
Dunn	0,0644	0,0039	0,0032	<b>0,1618</b>
Xie-Beni	4,6894	10,771	15,965	<b>0,7454</b>
SD	1,6031	2,0297	1,9851	<b>1,5932</b>
Silhouette	0,4489	0,3099	0,3199	<b>0,4498</b>

В данном случае индексы единогласно показали лучшим разбиение методов Варда на три кластера.

**Анализ результатов**

В результате эксперимента были получены следующие выводы: оценка методов кластеризации с помощью индексов оценки качества является субъективной и зависит от выбора характеристик объектов; вычисление расстояния между кластерами по методу Варда и методами определения количества кластеров основано на вычислении дисперсии, поэтому для метода Варда результаты лучше; для получения информативной структуры данных после разбиения необходимо несколько раз проводить кластеризацию с разными параметрами и сравнить результаты разбиения; нет универсального индекса оценки качества кластеризации, большое значение играет схожесть алгоритмов кластеризации и оценки качества.

Кроме того, можно отметить некоторые особенности применения методов кластеризации. Так, метод  $k$ -средних менее чувствителен к данным, которые «зашумляют» выборку. Об этом утверждении свидетельствуют значения индексов, которые в большинстве случаев выбирали лучшим разбиение именно этим методом.

Однако метод Варда разбивает данные более естественным образом, результаты разбиения легче интерпретировать. Метод чувствителен к выбранным характеристикам, для удачной кластеризации необходимо предварительно подробно изучить данные, при необходимости добавить или исключить характеристики объектов.

В ходе работы удалось выявить скрытый класс клиентов, который не относится ни к одному из двух кластеров, описанных банком. Эти клиенты засоряют выборку и увеличивают время работы алгоритма.

В результате клиентов банков необходимо делить не на две, а на три группы:

1-й кластер: имеют средний среднегодовой баланс на карте (около 1 471,6667 евро), частые клиенты банка (проходит мало времени с момента последнего пользования услугами банка), с клиентами мало связываются сотрудники банка для предоставления услуг, так как они ими пользуются часто, известна большая часть результатов кампаний (может быть связано с его малым количеством).

2-й кластер: имеют сравнительно высокий среднегодовой баланс (около 1 655,3 евро), редко обращаются в банк за услугами, таким чаще звонят и предлагают услуги, результаты маркетинговых кампаний чаще всего не носили категоричный характер (или отказ или согласие).

3-й кластер: имеют сравнительно низкий среднегодовой баланс (около 1 325 евро), не обращаются в банк за услугами вообще, не пользуются популярностью среди менеджеров банков, следовательно, нет информации о предыдущих кампаниях.

**Заключение**

В ходе выполнения работы были рассмотрены и реализованы методы кластеризации, метод определения количества кластеров и критерии оценки каче-



ства кластеризации. Критерии позволяют оценить качество разбиения объектов на группы разными методами и выбрать кластерную структуру.

Было произведено тестирование методов и критериев на наборе данных клиентов банков. В разных случаях результаты оценки качества кластеризации показывали разные значения, что объясняется чувствительностью методов к данным. В ходе анализа была выявлена скрытая группа клиентов, которые не учитывались в разбиении банка.

Таким образом, критерии оценки качества кластеризации лучше работают с методом Варда, который, в свою очередь, показывает более естественную кластеризацию.

#### *Литература*

1. Кластеризация – тонкая настройка клиентского потока в ритейле. New Retail [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://new-retail.ru/business/klasterizatsiya\\_tonkaya\\_nastroyka\\_klientskogo\\_potoka\\_v\\_riteyle3283/](https://new-retail.ru/business/klasterizatsiya_tonkaya_nastroyka_klientskogo_potoka_v_riteyle3283/), свободный (дата обращения: 25.02.2021).

2. Introduction to Information Retrieval / C.D. Manning, P. Raghavan, H. Schütze. – Cambridge University, 2008. – 356 p.

3. Шаговская Т.Б. Экспериментальные результаты исследования качества кластеризации разнообразных наборов данных с помощью модифицированного алгоритма ха-

мелеон / Т.Б. Шаговская, А.А. Заремская // Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – № 3/2(8). – С. 11–15.

4. Климов А. Кластерный анализ и сегментация. Tidy data блог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tidydata.ru/segmentation>, свободный (дата обращения: 25.02.2021).

5. Егоров А.В. Особенности методов кластеризации данных / А.В. Егоров, Н.И. Куприянова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – Тематический выпуск. – С. 174–177.

6. Стружко Н.М. Анализ качества алгоритмов кластеризации / Н.М. Стружко, В.В. Андропова, И.А. Тагиева // Аллея науки. – 2018. – № 7(23). – С. 895–904.

7. Киреев В.С. Оценка результатов кластеризации при использовании различных критериев качества // Программные продукты и системы. – 2009. – №3. – С. 36–39.

8. Halkidi M. On Clustering Validation Techniques / M. Halkidi, M. Vazirgiannis, Y. Batistakis // Journal of Intelligent Information Systems. – 2001. – № 17:2/3. – P. 107–145.

9. Сивоголовко Е.В. Методы оценки качества четкой кластеризации // Информационные системы. – 2011. – № 4. – С. 14–31.

---

**Злодеева Дарья Сергеевна**  
Студентка каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: [daryazlodeeva@yandex.ru](mailto:daryazlodeeva@yandex.ru)

*Секция 15*

**ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

*Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУРа,  
д-р техн. наук, профессор*



УДК 004.042

И.В. Альфедер, М.А. Гавриленко, И.Ю. Харина

## Распознавание нажатых клавиш с помощью нейронной сети

Рассмотрен вариант атаки на побочный вибрационный канал с целью перехвата данных нажатия конкретных клавиш на компьютерной клавиатуре. Перехват производится с помощью специализированно собранного для этого устройства на базе микроконтроллера atmega32 и датчика GY-521. Дальнейшие обработки сигнала происходят на компьютере с использованием фильтра Баттерворта. Конечное распознавание и идентификация клавиш происходят с помощью нейронной сети.

**Ключевые слова:** сбор данных, обработка данных, фильтр Баттерворта, нейронная сеть, побочный канал.

Для атак на информацию долгое время использовалось электромагнитное и оптическое излучение электронных устройств. Сравнительно недавно стала изучаться возможность использования акустического излучения (вибраций) от клавиатуры для атаки [1].

Нами были записаны вибрации от нажатий нескольких клавиш с помощью специально разработанного устройства. Собранные данные обработаны и использованы в нейросети, которая различает нажатые клавиши.

### Устройство для приема волн

Для улавливания сигналов вибрационных волн было собрано специальное устройство. Оно состоит из двух основных компонентов: акселерометра-гироскопа и принимающе-передающего устройства.

В качестве акселерометра-гироскопа был взят уже готовый модуль GY521, который основан на микросхеме MPU-6050. Микросхема включает в себя 3-осевой гироскоп и 3-осевой акселерометр. Сама микросхема работает от напряжения 3,3 В, однако в модуль встроены преобразователи напряжения с 5 до 3,3 В. Программируемый пользователем диапазон измерений акселерометра:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$  и  $\pm 16$  г. Программируемый пользователем диапазон измерений гироскопа:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  и  $\pm 2000$  °/с (градусов в секунду) [2]. Для данной работы потребуются самые низкие диапазоны измерения акселерометра и гироскопа.

Каждое значение, полученное модулем, кодируется в 16-ричный формат и передается по протоколу I2C принимающему устройству. В таком случае принимающее устройство примет шесть 16-ричных значений: 3 от акселерометра, 3 от гироскопа.

Главная задача данного устройства состоит в принятии сигнала от датчика и дальнейшую передачу данных для обработки компьютеру по последовательному порту.

В качестве такого аппарата на начальных этапах была выбрана плата Arduino UNO [3], в которой имеется основой 8-битный микроконтроллер ATmega328, работающий на частоте 16 МГц, что позволяет выполнять около 16 млн операций в секунду [4]. Питание на плату подается через разъем USB, через него же данные передаются на компьютер.

Для подключения датчика к принимающей плате необходимо соединить между собой следующие выводы устройств [5]:

– «Земля». Вывод «GND» на GY-521 и на Arduino;

– «Питание». Вывод «VCC» на GY-521 и «5V» на Arduino;

– «Линия тактирования». Вывод «SCL» на GY-521 и «A5» на Arduino;

– «Линия данных». Вывод «SDA» на GY-521 и «A4» на Arduino.

При подаче питания на Arduino должны «загореться» светодиоды на самой Arduino и на GY-521 при правильной сборке и исправности всех компонентов.

Для получения данных от модуля GY-521 была написана программа для Arduino UNO в среде разработки Arduino IDE. Программирование самой платы осуществляется через USB-порт. Сама программа не представляет собой что-либо сложное: микроконтроллер принимает данные от GY-521 и отправляет их на компьютер по последовательному порту [6].

Для принятия данных с Arduino UNO была написана программа на языке Python.

Результат считывания записывается в файл формата .csv для более удобной работы. Программа одновременно принимает данные как с датчиков, так и с клавиатуры для дальнейшей возможности использования данных для обучения нейронной сети.

### Обработка данных. Фильтр Баттерворта

Во время записи сигнала непосредственно к самому сигналу примешиваются и различные шумы. Это обусловлено не только тем, что идущий сигнал может отражаться от различных поверхностей, но и тем, что к сигналу могут примешиваться шумы извне, так как изолировать систему полностью нельзя.

Для разделения сигнала и шума был использован цифровой фильтр Баттерворта [7]. Так как сигнал записывается как последовательность отсчетов его фильтр будет основан на импульсной характеристике, которая может быть конечной или бесконечной.

Фильтр Баттерворта – это бесконечная импульсная характеристика с некоторым порядком, в нашем случае третьим. Покажем прохождение сигнала одного нажатия одной клавиши через этот фильтр. На рис. 1 представлены графики прохождения сигнала через фильтр каждого порядка

### Работа с нейронной сетью для определения нажатой клавиши

Для обработки данных и попытки различить нажатые клавиши была написана нейронная сеть на

языке Python. Для написания нейронной сети использовались библиотеки tensorflow [8] и keras.

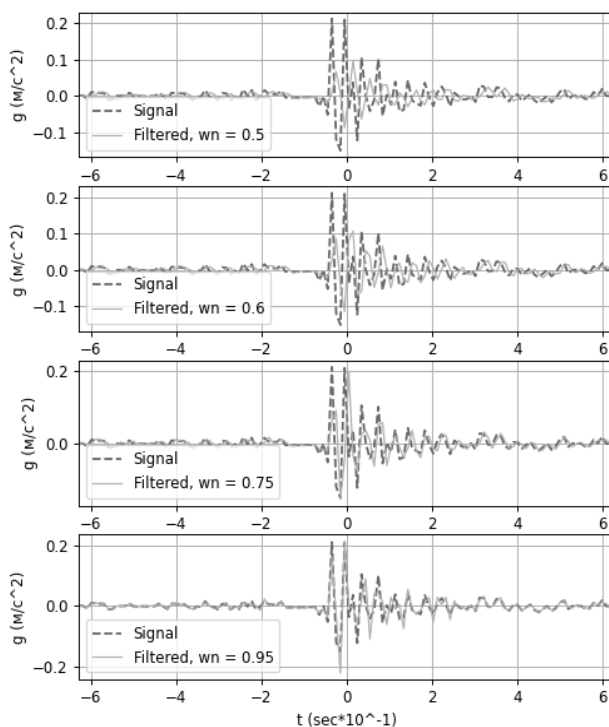


Рис. 1. Реализация фильтра Баттерворта 3-го порядка

Созданная нейронная сеть состоит из 3 основных слоев. Первый – входной слой – принимает матрицу, размерами  $6 \times 50$ , которая впоследствии конвертируется в строку длиной 300. Второй слой – промежуточный и состоит из 200 нейронов. Третий и последний слой являются выходными и включают в себя количество нейронов, равное сумме обрабатываемых клавиш, т.е. шесть.

Также добавлен вспомогательный слой Dropout, суть которого заключается в случайном отбрасывании ряда выходных характеристик, что способствует более качественной работе нейронной сети (рис. 2).

Model: "sequential\_102"

Layer (type)	Output Shape	Param #
flatten_56 (Flatten)	(None, 300)	0
dense_107 (Dense)	(None, 200)	60200
dropout_23 (Dropout)	(None, 200)	0
dense_108 (Dense)	(None, 6)	1206
Total params: 61,406		
Trainable params: 61,406		
Non-trainable params: 0		

Рис. 2. Модель нейронной сети

Длительность обучения нейронной сети составила 100 эпох. Это связано с малым количеством обучаемых данных. Объем обучающих данных составляет 80 нажатий, а тестовых данных – 8 нажатий.

На рис. 3 показаны результаты работы программы. Средняя эффективность нейронной сети на текущем наборе данных составляет 50%, при этом удавалось достичь максимальной эффективности в 75%. Такой разброс в эффективности нейронной сети указывает на ее нестабильность.

Эффективность: 0.75

<function matplotlib.pyplot.show(close=None, block=None)>

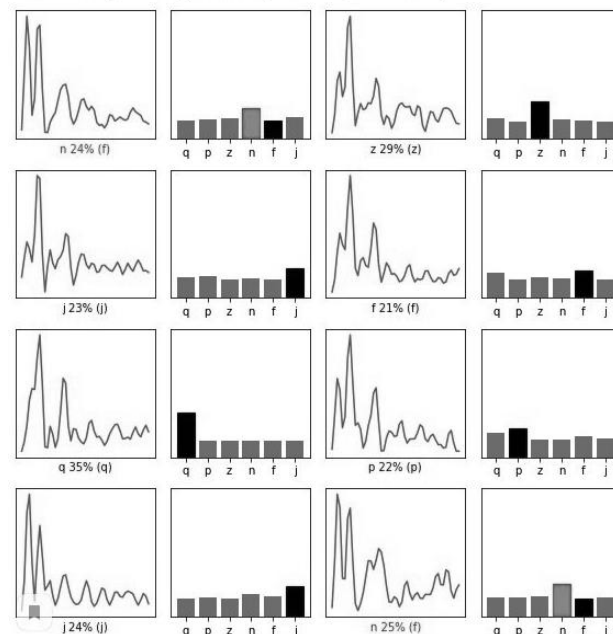


Рис. 3. Результат работы нейронной сети

### Заключение

В ходе работы были получены данные, которые впоследствии обрабатываются и направляются на обработку в нейронную сеть. Разброс показателей эффективности работы сети достаточно большой, что говорит о её нестабильности. Поэтому в настоящий момент ведется работа над повышением эффективности и стабильности нейронной сети, а также над повышением частоты снятия данных и улучшением фильтра. Работа была выполнена в рамках ГПО, проект КИБЭВС-2001.

### Литература

1. Asonov D., Agrawal R. «Keyboard acoustic emanations // IEEE Symposium on Security and Privacy, 2004. Proceedings. – 2004. – P. 3–11. doi: 10.1109/SECPRI.2004.1301311
2. Даташит на MPU-6050 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iarduino.ru/lib/714fa041ac2ac8d7d3ab050f6c8f82b8.pdf>, свободный (дата обращения: 17.07.2021).
3. Информация про плату Arduino UNO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arduino-uno.ru/>, свободный (дата обращения: 17.07.2021).
4. Даташит ATmega328 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/549/DOC001549488.pdf>, свободный (дата обращения: 17.07.2021).
5. I2C протокол [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wiki.iarduino.ru/page/i2c-kratkoe-opisaniye/>, свободный (дата обращения: 17.07.2021).

6. Работа с Serial Port Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/>, свободный (дата обращения: 17.07.2021).

7. Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://nbviewer.jupyter.org/github/capitanov/dsp-theory/blob/master/src/dsp\\_theory\\_06\\_iir\\_fir\\_filters.ipynb](https://nbviewer.jupyter.org/github/capitanov/dsp-theory/blob/master/src/dsp_theory_06_iir_fir_filters.ipynb), свободный (дата обращения: 17.07.2021).

8. Официальный сайт библиотеки tensorflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/overview?hl=ru>, свободный (дата обращения: 13.06.2021).

**Альфедер Игорь Викторович**  
Студент каф. КИБЭВС  
Эл. почта: [alfedet@gmail.com](mailto:alfedet@gmail.com)

**Гавриленко Максим Александрович**  
Студент каф. БИС  
Эл. почта: [maxga.2000@mail.ru](mailto:maxga.2000@mail.ru)

**Харина Ирина Юрьевна**  
Студентка каф. БИС  
Эл. почта: [ira.kharina.2000@mail.ru](mailto:ira.kharina.2000@mail.ru)

**А.Э. Корнев, Г.С. Белокрылов, Р.Д. Брылев, Н.А. Калинин**

## Обзор на тему «Умные часы»

С помощью умных часов можно узнать много конфиденциальной информации. Сначала будут рассмотрены сценарии набора текста, где нажатия клавиш будут представляться за счет всплесков активности датчиков движения. Модель будет обучаться, а затем пробовать угадывать, какие клавиши были нажаты пользователем. Целью настоящей работы является рассмотрение атаки с помощью умных часов.

**Ключевые слова:** смарт-часы, атака, канал, сторонние каналы, взлом, безопасность, информация, информационная безопасность.

Для восстановления событий нажатия клавиш на устройстве используются датчики движения смартфона. Рассматривается пользователь, набирающий текст на цифровой сенсорной клавиатуре смартфона и одновременно носящий на одной из рук смарт-часы. В первом случае смарт-часы и смартфон находятся на одной руке, и пользователь набирает текст рукой, не держащей смартфон, также называемый сценарием SH-NHNT. Во втором случае смарт-часы и смартфон снова находятся на одной руке, и пользователь набирает текст пальцем (как правило, большим) руки, держащей смартфон, также называемый сценарием SH-NHT. В третьем случае смарт-часы и смартфон находятся на разных руках, и пользователь набирает текст рукой, не держащей смартфон, также называемый сценарием DH-NHNT.

### Модель угрозы

Предполагается, что противник, целью которого является определение нажатия клавиш на цифровой клавиатуре смартфона, основывается на движениях запястья, воспринимаемых датчиками движения смарт-часов [3]. Противник может получить доступ к смарт-часам цели, установив на них вредоносное приложение, которое записывает активность встроенных датчиков акселерометра и гироскопа. Этот шаг может быть достигнут путем использования известных программных уязвимостей или путем обмана жертвы с целью установки вредоносного кода, например с помощью троянской программы.

Исходя из того, что большинство распространенных операционных систем смарт-часов (например, Android Wear от Google, watchOS от Apple и т.д.) не реализуют контроль доступа и / или уведомления пользователя об использовании датчиков движения, вредоносное приложение может получить неограниченный и незамеченный доступ к встроенным акселерометру и гироскопу. В результате взломанные смарт-часы могут выступать в качестве подслушивающего устройства, которое сами жертвы могут разместить на своем запястье, не подозревая, что оно находится у них на запястье во время набора текста на смартфоне.

Предложенная атака определяет нажатую цифровую клавишу на основе характеристик основного физического события – движения запястья во время набора текста (или нажатия) на смартфоне. Характеристики записи нажатия клавиши должны улавливать как можно больше признаков основного трехмерного

движения, вызванного нажатием клавиши. Правильно спроектированный вектор признаков должен быть схож с другими векторами признаков той же клавиши и одновременно быть отличимым от векторов признаков других клавиш [1, 2].

Характеристики частотной области необходимы для определения различных возвратных или колебательных движений запястья.

Электромагнитные сигналы, исходящие от устройств, использовались для вывода приватной информации, хранящейся на смарт-картах, данных, передаваемых по кабелям RS-232, и контента, воспроизводимого на ЭЛТ и светодиодных мониторах [4].

### Обучение и классификация

Тем не менее каждый метод классификации имеет свои преимущества и недостатки, что стало причиной принять подход ансамблевой классификации. Ансамблевые подходы более точные и надежные, чем любой отдельный алгоритм классификации. Метод ансамбля включает как линейные (SLR, SVM), так и нелинейные (k-NN, RF, BDT) методы. Более того, RF и BDT сами по себе являются сильными ансамблевыми классификаторами, что делает структуру классификации еще более надежной.

Такой разнообразный набор алгоритмов классификации увеличивает вероятность повышения точности классификации по сравнению с одним алгоритмом. После того как все классификаторы были обучены с использованием помеченных данных, векторы признаков немаркированных записей нажатия клавиш классифицируются с использованием этих обученных классификаторов (на этапе атаки) с использованием стратегии ансамбля. Для определения окончательного результата классификации используется стратегия ансамбля «большинство выигрывает».

### Исследование SH-NHNT и SH-NHT

#### (оценка классификационных атак)

Smartwatch носили на левой руке для SH-NHNT и на правой руке для SH-NHT. Линейный акселерометр умных часов был дискретизирован с частотой 50 Гц. «Один против одного» в этом случае измеряется процент успешных выводов для отдельного участника с классификаторами, обученными на обучающей выборке того же участника. «Один против одного» – это не только лучший сценарий, но и пример, как будет выполняться атака, если злоумышленник сможет собрать данные обучения для конкретной цели.

«Один против остальных»: в этом случае измеряется процент успешных выводов для отдельного участника с классификаторами, обученными на выборке остальных участников (не включая целевого участника). «Один против остальных» – это типичный сценарий, когда у злоумышленника есть цель, но он не может получить от неё помеченные обучающие данные.

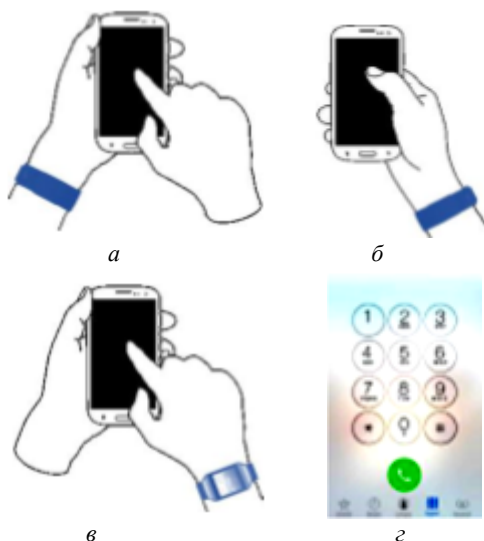


Рис. 1. Смарт-часы и смартфон на экране: набор текста одной недержашей рукой (SH-NHNT) – а; набор текста одной держащей рукой (SH-NHT) – б; набор текста другой недержашей рукой (DH-NHNT) – в; цифровая клавиатура, используемая в экспериментах, – г

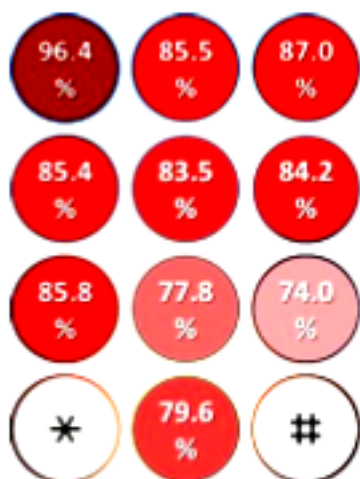


Рис. 2. Вероятность нажатий клавиш при разблокировке

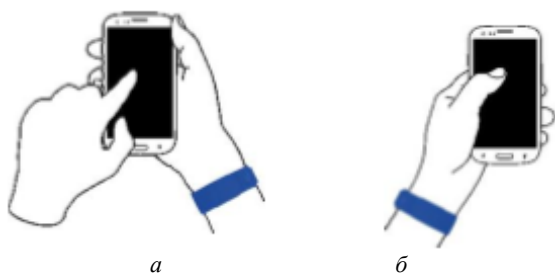


Рис. 3. Варианты сценариев типизации на рис. 1, а и б

«Все против всех»: в этом случае измеряется процент успешных выводов для всех участников с классификаторами, обученными на основе обучающей выборки всех участников. «Все против всех» помогает понять, как будет работать структура атаки, если злоумышленник построит разнородный обучающий набор данных, чтобы вывести нажатия клавиш от нескольких неспецифических целей.

В целом результаты подтверждают утверждение о том, что датчики движения умных часов являются возможным побочным каналом для определения нажатий клавиш на мобильных экранах. Из-за использования техники ансамблевой классификации общее время вычислений является суммой времени, затраченного на пять составляющих алгоритмов классификации. Среднее общее время вычислений в сценарии «Один против одного» составило менее 12 мин, около 21 мин в сценарии «Один против остальных» и около 34 мин в сценарии «Все против всех».

Применяя структуру атаки к данным смартфона и сравнивая результаты с результатами, полученными с использованием умных часов, позволяет понять, насколько более или менее уязвимыми делает нас побочный канал на основе датчика движения, исходящий от умных часов, по сравнению с известными побочными каналами на основе движения на смартфоне целевых пользователей. Интересный образец точности классификации можно наблюдать для вывода с использованием только данных смартфона в SH-NHT. Точность классификации некоторых ключей (в зависимости от их расположения) значительно выше, чем для других.

Чтобы провести исчерпывающее сравнение между угрозой логического вывода, исходящей от различных датчиков движения, присутствующих на умных часах и смартфоне, проводятся дополнительные эксперименты с использованием данных широкого спектра, которые являются еще одним широко изучаемым побочным каналом для логического вывода нажатия клавиш.

Для этого эксперимента были записаны данные о движении, связанные с нажатием клавиш, включая измерения линейного акселерометра и гироскопа, как со смартфона, так и с умных часов. Были получены 59 характеристик временной и частотной области из данных трехмерного гироскопа обоих устройств, таких как минимальные и максимальные значения, среднее значение, дисперсия, асимметрия, эксцесс, углы вершин, количество пиков, интервалы между пиками, скорость затухания и т.д. Средняя точность классификации незначительно ниже при использовании только гироскопа для умных часов.

### Объединение данных смарт-часов и смартфонов

Поскольку большинство современных операционных систем и приложений для смарт-часов требуют, чтобы часы были сопряжены со смартфоном, такая атака вполне реальна. Результаты этих экспериментов показывают, что точность действительно



повышается, когда объединяются признаки смарт-часов и смартфона.

Более реалистичная обстановка: естественный или неконтролируемый набор текста. Точность определения составила 52 и 61% для SH-NHNT и SH-NHT соответственно.

Новые данные собирались при той же частоте дискретизации 50 Гц. Результаты показывают, что хотя средняя точность классификации немного снизилась на Urbane W150 (SH-NHNT: 70,08% против 67,41%, SH-NHT: 71,16% против 70,83%), дисперсия значительно ниже в случае передач (SH-NHNT: 26,62 против 56,26, SH-NHT: 17,24 против 77,0). Хотя такая тенденция интуитивно понятна, она тем не менее показывает, что умозаключения по нажатию клавиш с использованием предложенной схемы все еще выполняемы с разумной точностью даже в таких реалистичных условиях.

Хотя низкая точность классификации отдельных клавиш является препятствием для проведения эффективных атак на умозаключения, важно отметить, что наиболее запутанные клавиши обычно соседствуют с реальной клавишей.

Двухсторонний t-тест на точность классификации «Один против остальных» для вариаций SH-NHNT дал значение  $t = 0,46$ ,  $p = 0,65$ . Для вариаций SH-NHT получено значение  $t = 0,61$ ,  $p = 0,54$ . Оба результата не являются значимыми при  $p < 0,05$ , что говорит о том, что наша структура атаки не зависит от атак на эти вариации. В рамках этой же схемы можно проводить атаки на вывод для этих вариаций, просто переобучая классификаторы.

Соответственно, для сценария DH-NHT система распознавания нажатия клавиш использует супервизуальное машинное обучение, чтобы сначала классифицировать переходные движения между последовательными нажатиями клавиш. Затем, предполагая разумное распределение набираемых цифр, при отслеживании на клавиатуре нескольких переходных направлений между целевой последовательностью нажатий клавиш мы получаем уникальные или сильно сокращенные возможности для целевой последовательности.

#### **Исследование DH-NHNT (система атаки на основе относительных переходов)**

Классификация переходов: классифицируются переходы на основе кардинальных направлений. Логика такой классификации заключается в том, что переходы в одном и том же направлении приводят к схожим движениям запястья. Например, движение запястья между цифрами 4 и 1 будет похоже на движение запястья между 6 и 3 (север), движение запястья между цифрами 4 и 7 будет похоже на движение запястья между 6 и 9 (юг) и т.д. Один классификатор обучается для каждого возможного переходного направления: север (N), юг (S), восток (E), запад (W), северо-восток (NE), северо-запад (NW), юго-восток (SE), юго-запад (SW) и повтор (O). Для достижения более высокой способности к умозаключениям с по-

мощью трассировки (объясняется позже) классификации переходов также должны быть равномерно заполнены. Количество возможных переходов в каждой из девяти вышеперечисленных категорий распределяется достаточно равномерно и колеблется между 9 и 14.

Определение клавиши: соответствие пары клавиш определяется предшествующим и последующим переходами, при этом отсеивая пары клавиш, которые не могут быть нажаты в последовательности. В случае если в результате трассировки для перехода была получена уникальная идентифицированная пара клавиш, нажатые клавиши до и после этого перехода могут быть определены непосредственно. В других случаях, когда трассировка приводит к нескольким возможным парам клавиш для перехода, клавиши, нажатые до и после этого перехода, могут быть определены либо по нескольким испытаниям, либо по другим смежным парам клавиш. Из трех методов для отслеживания перехода: Forward Tracing (переходы идут в том же порядке, в каком были нажаты клавиши), Backward Tracing (наоборот, соответственно) и Bidirectional Tracing (в обе стороны) – был выбран Bidirectional Tracing, чтобы уменьшить вероятность ошибки.

При такой оценке классификаторы переходов смогли правильно классифицировать 191 переход-запись (точность 88,42%), а оставшиеся 25 неправильных или неклассифицированных переходов внесли ошибку в 17 тестовых последовательностей. Также наблюдается, что неправильное предсказание чаще всего происходит сразу после предыдущего неправильного предсказания.

Таким образом, из 240 клавиш правильно было определено 85 (точность 43,75%).

Относительно низкая точность умозаключений связывается с тремя основными причинами:

- 1) неправильно классифицированные переходы вносят ошибку не в одно, а в два нажатия клавиш;
- 2) неклассифицированные переходы не вносят ошибку, но нет средства восполнить недостающую информацию;
- 3) даже очень небольшое количество пар клавиш, конкурирующих между собой, делает невозможным точное определение нажатой клавиши. Более неоднозначные последовательности требуют дополнительного количества испытаний (в худшем случае).

Объединение результатов смарт-часов и акселерометра смартфона позволило реализовать точность в 82,5%. При более реалистичных условиях (небольшая задержка или помехи) точность снизилась до 38,33% (69 из 180 клавиш были определены верно). Также на достоверное определение влияют поза пользователя и его движение (езда на поезде, бег и т.д.), что создает дополнительные помехи для злоумышленника. Быстрый разряд батареи часов может раскрыть преступника, поэтому следует либо уменьшить частоту дискретизации, либо считывать данные только во время набора текста.

Чтобы улучшить считывание, можно использовать трассировку случайным шагом – это уменьшит вероятность неправильных классификаторов. В этом алгоритме трассировки выбирается случайная подпоследовательность различной длины и применяется двунаправленная трассировка. Процесс повторяется несколько раз, так что каждый переход охватывается несколько раз, и каждое нажатие клавиши может иметь несколько кандидатов.

Защита от атаки довольно проста: следует реализовать системный или определяемый пользователем доступ к сенсорам.

#### **Заключение**

Была рассмотрена атака с помощью умных часов, которую можно реализовывать различными способами при различных сценариях. Однако защититься от нее возможно.

#### *Литература*

1. Атаки с использованием бокового канала на мобильные клавиатуры с помощью смарт-часов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8263143>, свободный (дата обращения: 21.09.2021).

2. Бергер У., Вул А., Йердор А. Атаки на словарь с использованием акустических эманаций клавиатуры // ACM CCS, 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1180405.1180436>, свободный (дата обращения: 18.09.2021).

3. Zhu T., Ma Q., Zhang S., Liu Y. Context-free attacks using keyboard acoustic emanations // ACM CCS, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2660267.2660296>, свободный (дата обращения: 18.09.2021).

4. Кун М., Андерсон Р. Soft tempest: Скрытая передача данных с использованием электромагнитных эманаций // Information Hiding. – 1998. – С. 124–142 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cl.cam.ac.uk/~mgk25/ih98-tempest.pdf>, свободный (дата обращения: 21.09.2021).

---

#### **Корнев Артур Эдуардович**

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: tura9@mail.ru

#### **Белокрылов Глеб Сергеевич**

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: belokrylov02@mail.ru

#### **Брылев Роман Дмитриевич**

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: brylev.01@inbox.ru

#### **Калинин Никита Андреевич**

Студент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: allakey2809@mail.ru

И.Е. Вдовина, Е.А. Прозорова

## Атаки по тепловому каналу

Рассмотрены тепловые атаки по сторонним каналам, проведено тестирование изменения температуры центрального процессора во время выполнения им различных запросов с помощью программы, написанной на языке программирования C#.

**Ключевые слова:** температура центрального процессора, атака по побочному каналу.

Цель данной работы – изучить тепловые атаки по сторонним каналам, рассмотреть влияние выполняемых программ на изменение температуры центрального процессора.

Атаки по тепловым каналам – это вид атак, направленных на считывание, обработку и использование тепла, излучаемого компьютером, сервером или смартфоном.

Одним из способов проведения атак по тепловому каналу является перехват нажатия клавиш на клавиатуре для того, чтобы впоследствии обработать и воспроизвести набранный текст. Таким образом, с помощью, например, термальной камеры, встроенной в смартфон, злоумышленник может похитить чужие пароли и PIN-коды, считав их с клавиш спустя минуту после набора.

По аналогии с клавиатурным тепловым следом можно отслеживать температуру процессора. Общедоступные сведения о средней температуре ЦП во время его работы позволят злоумышленникам точно определить момент времени, когда использование вредоносного ПО будет наиболее эффективно. Целью данной работы является исследование особенностей нагревания процессора при работе тестовых программ.

### Тестирование температуры процессора

В рамках данной работы были проведены тесты температур для процессора «Intel® Core i5-5200U CPU @2.20 GHz». Для этого была написана программа на C#. Данная программа вычисляет температуру процессора с помощью библиотеки «openhardware-monitor.hardware» [4].

Окно программы состоит из тестового поля, в котором видны все ядра процессора и их температуры, а также результирующая температура процессора, которая обозначена как «CPU Package». Кнопки «начать» и «закончить» предназначены для запуска измерений. Если нажать кнопку «начало» начнется считывание температуры процессора с интервалом в 2000 мс. После нажатия на кнопку «закончить» программа останавливает расчет, на текстовом поле остаются последние выведенные данные о температуре процессора.

Данные, полученные в ходе работы программы, автоматически записываются в текстовый файл и используются для анализа изменения температуры центрального процессора и построения графиков (рис. 1).

Для каждого теста, кроме самого первого, был реализован один и тот же алгоритм работы. После за-

пуска программы следовала минута бездействия, в этот момент не было запущено ни одной программы. После истечения одной минуты также запускалась программа, и до окончания второй минуты снова было бездействие. Таким образом, первый тест характеризует колебание температуры процессора в условиях бездействия.

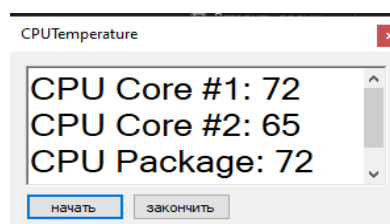


Рис. 1. Окно программы для вычисления температуры процессора

Второй, третий и четвертый тесты проводились при запусках программ, написанных на языке C++. Первая программа выводила надпись «Hello world», вторая прибавляла к числу  $n = 0$  единицу десять раз с помощью цикла, третья умножала число  $n = 1$  на два десять раз.

Пятый и шестой тесты проводились при запуске программы, написанной на языке Python. Программы аналогичны тем, которые были использованы в предыдущих тестах, написанных на C++. После проведения тестов были построены графики и проанализированы результаты каждого теста.

По результатам первого теста можно увидеть, что для данного процессора в условиях бездействия температура колеблется около 44 °С.

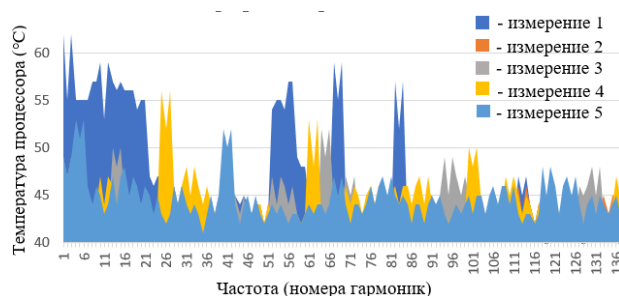


Рис. 2. График первого теста

По второму тесту видно, что программа «Hello World» нагревает процессор в среднем на 11,4 °С.

По третьему тесту видно, что программа на C++, которая прибавляет к числу единицу десять раз, с помощью цикла нагревает процессор в среднем на 15,4 °С.

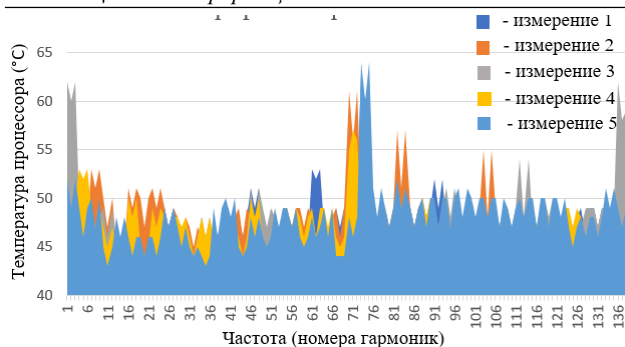


Рис. 3. График второго теста

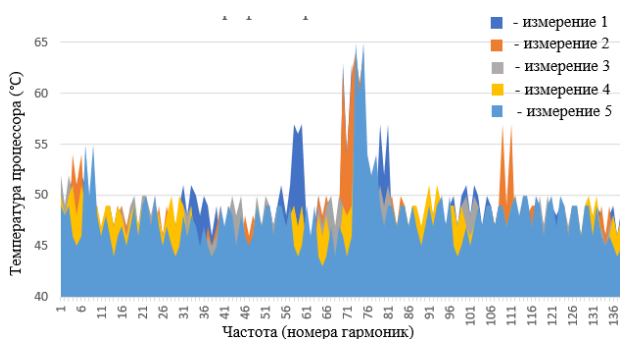


Рис. 4. График третьего теста

По четвертому тесту видно, что программа на C++, которая умножает число на 2 десять раз с помощью цикла нагревает процессор в среднем на 10 °C.

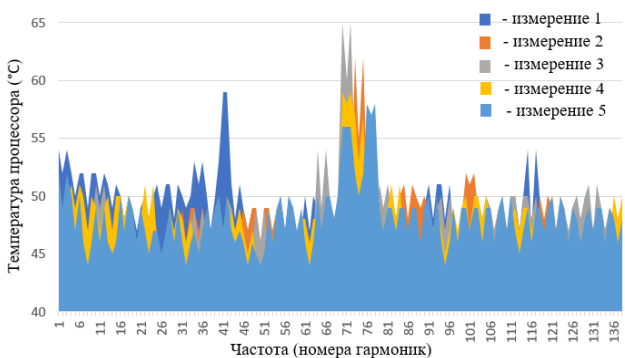


Рис. 5. График четвертого теста

По пятому тесту видно, что программа «Hello World» на Python нагревает процессор в среднем на 12,6 °C.

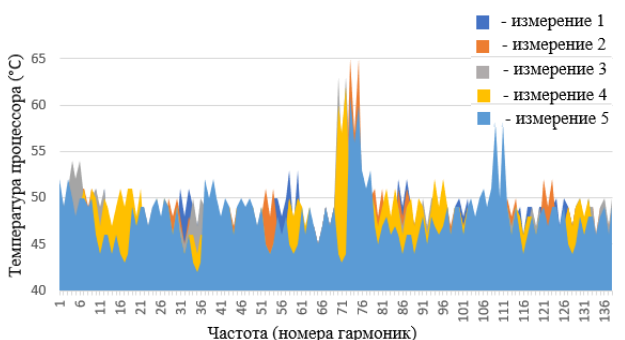


Рис. 6. График пятого теста

По шестому тесту видно, что программа на Python, которая прибавляет к числу единицу десять

раз, с помощью цикла нагревает процессор в среднем на 13 °C.

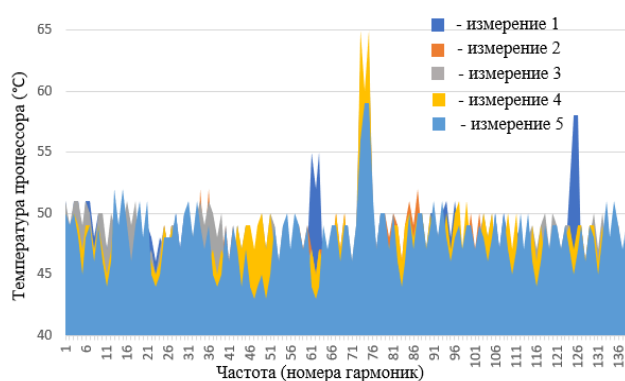


Рис. 7. График шестого теста

Также нужно отметить, что на графиках программа запускалась примерно на шестьдесят шестом номере гармоник.

**Методы противодействия атакам по тепловым каналам**

1. Экранирование.

Достаточно сильное физическое экранирование устройства позволит устранить почти все побочные каналы утечки информации. Недостатком экранирования является существенное увеличение стоимости и размеров устройства.

2. Устранение условных переходов.

Защититься от множества атак по сторонним каналам можно, устранив в алгоритме операции условного перехода, зависящие от входных данных или секретного ключа. В идеале алгоритм вообще не должен содержать операторов ветвления, зависящих от входных данных или ключа, и все вычисления должны производиться с помощью элементарных побитовых операций.

3. Использование систем охлаждения.

Как и любой другой мощный компонент аппаратного обеспечения ПК, процессор выделяет тепло во время работы и должен надлежащим образом охлаждаться. Использование жидкостных или воздушных систем охлаждения позволит достичь максимальной производительности, а также затруднит использование злоумышленниками теплового излучения ЦП.

**Заключение**

В ходе работы рассмотрено различное влияние выполняемых программ на изменения температуры центрального процессора. Показано изменение амплитудного спектра записей датчиков температуры в зависимости от характера вычислительных операций.

Работа выполнена в рамках проекта ГПО КИБЭВС 2001 «Атаки по сторонним каналам».

*Литература*

1. Hutter M., Schmidt J.-M. The Temperature Side Channel and Heating Fault Attacks. – 2014. – 17 p.  
 2. Islam M.A., Ren S., Wierman A. Exploiting a Thermal Side Channel for Power Attacks in Multi-Tenant Data Centers. – 2017. – 16 p.

3. Атака Thermanator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xaker.ru/2018/07/05/thermanator/> (дата обращения: 10.11.2020).

4. Open Hardware Monitor Class [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/iot.device.hardwaremonitor.openhardwaremonitor?view=iot-dotnet-1.5> (дата обращения: 10.09.2021).

**Вдовина Ирина Евгеньевна**  
Студентка каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: blum1909@mail.ru

**Прозорова Елизавета Александровна**  
Студентка каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: el.prozorova2000@yandex.ru

УДК 621.376.9

М.А. Сысолина, В.С. Аврамчук

## Оценка влияния шума на искажения физического уровня стандарта IEEE 802.11

Представлены сведения о механизмах и технологиях, применяемых в стандарте IEEE 802.11 для организации физического уровня. Реализована модель физического уровня стандарта IEEE 802.11, изучено влияние уровня шума на интенсивность появления битовой ошибки, приведена оценка интенсивности появления ошибки при передаче данных на разных скоростях.

**Ключевые слова:** IEEE 802.11, шум, интенсивность появления битовой ошибки, моделирование, BER.

Ратификация беспроводной локально-вычислительной сети стандарта IEEE 802.11 на рубеже XX–XXI вв. вызвала большой резонанс. Стандарт претерпел существенные изменения в связи с обновлениями и появлением новых модификаций. Невзирая на появление первых форматов стандарта почти 20 лет назад, сети стандарта IEEE 802.11 широко применяются и в настоящее время в корпоративном сегменте, определяя задачи передачи данных, а также в персональных устройствах домашнего пользования. Большое количество устройств продолжают применять наиболее ранние версии стандартов. Что касается более поздних модификаций, то они являются обратно совместимыми с предыдущими.

Возникающие сложности при обеспечении надежности связи провоцируют проблему при передаче данных, происходят потери, повреждения, многие пакеты принимаются с ошибками.

Стандарты группы 802.11 реализуют передачу данных на базе стека протоколов TCP/IP на физическом уровне сетевой модели OSI. На данный момент технология WiFi, являющаяся подгруппой 802.11, является наиболее распространенным способом организации беспроводных локальных сетей. На практике из множества вариаций данного стандарта беспроводной передачи данных в большинстве случаев используются стандарты IEEE 802.11a, IEEE 802.11b и IEEE 802.11g, которые были признаны Инженерным институтом электротехники и радиоэлектроники [1, 2].

**Стандарт IEEE 802** – самый распространённый стандарт беспроводных сетей, функционирующий на полосе частот 2,4–2,4835 ГГц. В стандарте применяется технология расширения спектра методом прямой последовательности DSSS, которая позволяет повысить помехоустойчивость передаваемого сигнала. Данный метод позволяет увеличить случайность распознавания сигнала практически безошибочно на приемнике при условии наличия шума, тем самым добавляя в исходный сигнал избыточность [3].

Разработчиками стандарта обозначены четыре обязательные скорости 1; 2; 5,5 и 11 Мб/с.

Применение последовательности Баркера способствует данному расширению. Кодирование заключается в встраивании в каждый передаваемый информационный бит кода, состоящего из 11 элементов и имеющего неслучайную последовательность:

11100010010. Кроме последовательности Баркера, в 802.11b используется кодирование с помощью комплиментарных кодов (Complementary Code Keying, CCK). Если говорить в общих чертах, то применение CCK-кодов позволяет кодировать 8 бит на один символ при скорости 11 Мбит/с и 4 бита на символ при скорости 5,5 Мбит/с. Так как один информационный бит заменяется целой последовательностью, то длительность одного мини-бита последовательности становится меньше, а следовательно, спектр этого сигнала расширяется со всеми вытекающими новыми свойствами сигнала [4].

В стандарте 802.11b для передачи сигналов применяются следующие виды модуляции:

– двоичная относительная фазовая модуляция (DBPSK);

– квадратурная относительная фазовая модуляция (QDPSK).

Кодирование информации при таком виде модуляции происходит за счет изменения (сдвига) фазы по отношению к предыдущему состоянию сигнала, таким образом, приемнику необходимо принимать изменение фазы, а не абсолютное значение сигнала. Данная модуляция проста в реализации, поскольку не является синхронной.

Получение относительной двоичной фазовой модуляции (DBPSK) и относительной квадратурной фазовой модуляции (DQPSK) осуществляется при появлении логического 0, происходит преобразование сигнала на инверсный, а при появлении единицы сигнал не меняется.

### Стандарт IEEE 802.11a

Стандарт 802.11a работает в частотном диапазоне 5 ГГц (от 5,15 до 5,350 ГГц и от 5,725 до 5,825 ГГц), рекомендуемая скорость передачи данных которого до 54 Мбит/с (8 основных выделенных скоростей – 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Мбит/с). К использованию 5 ГГц частотного диапазона привело переполнение большим количеством устройств, работающих на частоте 2,4 ГГц, поэтому был выделен частотный диапазон 5 ГГц, который был менее подвержен помехам.

В стандарте данной модификации применяется технология OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, т.е. применение большого количества близко расположенных ор-

тогональных поднесущих. Реализация данного способа осуществляется в передатчике с помощью обратного преобразования Фурье (IFFT), которое предварительно переводит сигнал из временного представления в частотное.

Протокол 802.11a использует аналогично 802.11b фазовую модуляцию, но не относительную – двоичную и квадратурную фазовые модуляции BPSK и QPSK.

При использовании BPSK-модуляции в одном символе кодируется только один информационный бит, при QPSK-модуляции (когда фаза сигнала может принимать четыре различных значения) в одном символе кодируется два информационных бита. На скоростях 6 и 9 Мбит/с для передачи данных используется BPSK-модуляция, а на скоростях 12 и 18 Мбит/с модуляция QPSK.

Передача на более высоких скоростях оперирует квадратурной амплитудной модуляцией QAM (16-QAM и 64-QAM), где информация кодируется за счет изменения таких параметров, как фаза и амплитуда. 16-QAM подразумевает 16 различных состояний сигнала и позволяет закодировать в 1 символе 4 бита на скоростях 24, 36 Мбит/с, а 64 позволяет закодировать в 1 символе последовательность 6 битов при скоростях 48, 54 Мбит/с.

Аналогично 802.11b в формате «a» применяется кодирование последовательностью Баркера и ССК-

кодирование на низких скоростях, на более высоких для обеспечения достоверности на стороне приемника используется двоичное символьное сверточное кодирование (Packet Binary Convolutional Coding, PBCC) – применение избыточной информации, когда к последовательности передаваемых битов добавляются служебные биты, зависящие от предыдущих переданных битов [5].

Как было сказано ранее, на малых скоростях: 1–2 Мбит/с обязательно применяется метод кодирования – последовательность Баркера, на 5,5 и 11 Мбит/с используется ССК-кодирование, но также опционально предусмотрен метод PBCC. Более высокие скорости передачи могут быть достигнуты как при OFDM, так и опционально ССК-OFDM.

### Моделирование

Моделирование стандарта 802.11b осуществляется в блоках передатчика («Transmitter»), приемника («Receiver») и канала («Channel»). Верхний уровень модели физического уровня стандарта IEEE 802.11b в Simulink представлен на рис. 1. Получение данных об искажениях происходит в блоке «BER Calculation», где в три поля индикатора записываются следующие данные:

- отношение неверно принятых бит к общему количеству переданных бит;
- количество неверно принятых бит;
- общее количество переданных бит [21].

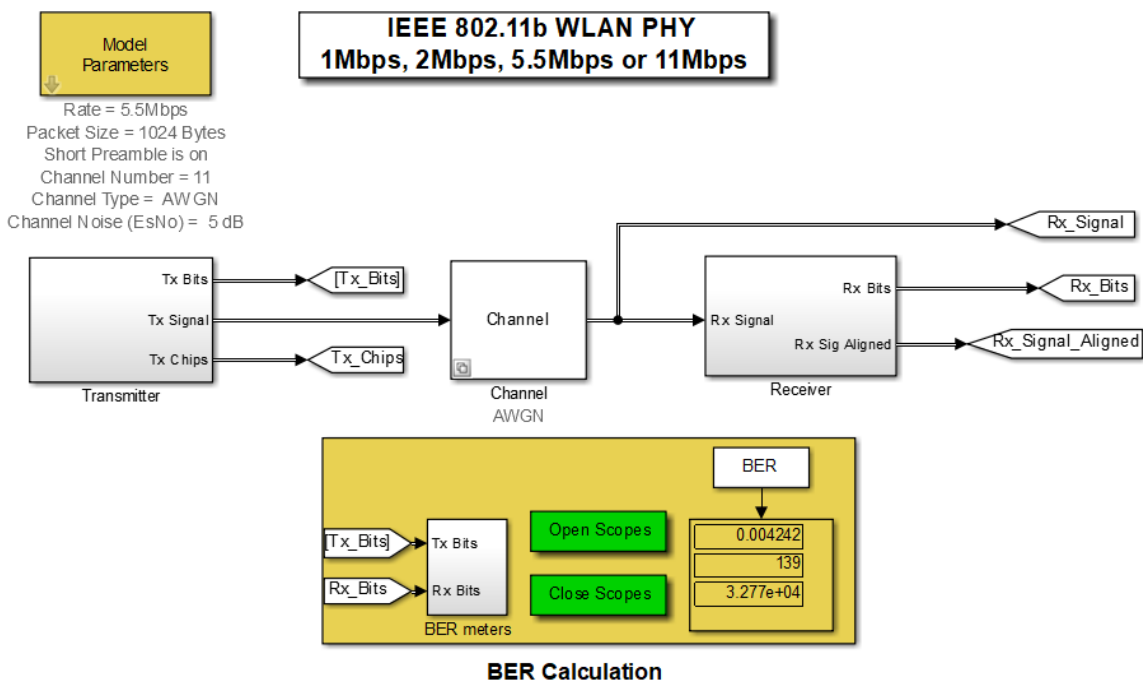


Рис. 1. Верхний уровень модели 802.11b

В блоке «Model Parameters» устанавливаются следующие параметры: скорость передачи, размер передаваемого пакета в байтах, разрешение/запрет использования короткой преамбулы, номер используемого канала, тип канала (с помехами или без помех), отношение сигнал / шум в децибелах (при условии выбора канала с помехами).

Верхний ряд блоков содержит компоненты передатчика, а нижний – приемника. Верхний уровень модели физического уровня стандарта IEEE 802.11a в Simulink представлен на рис. 2. Модель содержит компоненты, моделирующие основные характеристики стандарта 802.11a.

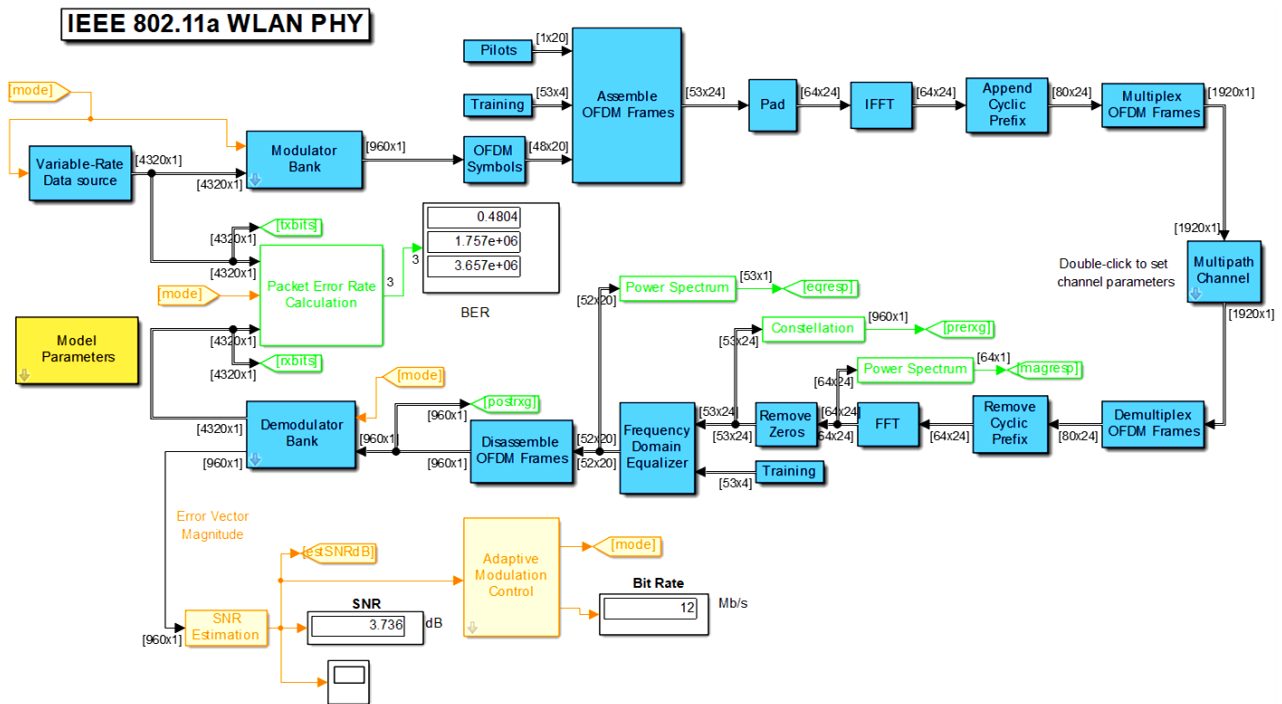


Рис. 2. Верхний уровень модели 802.11a

Блок конфигурации, называемый «Model Parameters», позволяет задавать следующие параметры: состав каждого кадра OFDM (количество символов на блок передачи, количество символов последовательности), пороги низкого отношения с/ш, коэффициент гистерезиса, глубина трассировки для декодера Viterbi. Одним из параметров, представляющих особый интерес, является параметр пороговых значений Low-SNR. Это семизлементный вектор, который показывает, как при моделировании следует выбирать скорость передачи данных на основе оценки SNR. Блок «BER» аналогичен блоку, представленному в модели 802.11b. Блок «Bit Rate» показывает, какая из битовых скоростей, указанных в стандарте, используется в настоящее время.

**Результаты моделирования**

Для установления искомого соотношения сигнал / шум был проведен ряд итераций моделирования, где для каждой из возможных скоростей передачи изменялось соотношение сигнал / шум в блоке задания параметров и производилось фиксирование полученного коэффициента искажений на бит. При этом прочие параметры оставались неизменны: размер передаваемого пакета – 1024 байт, преамбула – полная, номер канала – 11, тип канала – зашумленный.

По полученным данным для большей наглядности построены графики (рис. 3, 4), отражающие зависимость интенсивности появления битовых ошибок от отношения сигнал / шум для разных скоростей.

Ноль означает, что для данного отношения сигнал/шум на каждой из отдельных итераций моделирования интенсивность появления битовых ошибок была равна нулю. Также стоит отметить, что чем выше значение отношения сигнал / шум (SNR), тем меньше сказывается влияние помех на выходной сигнал.

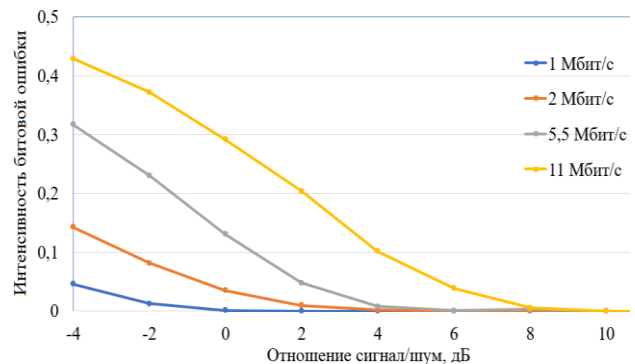


Рис. 3. Зависимость интенсивности появления битовых ошибок от отношения сигнал / шум для разных скоростей в стандарте 802.11b

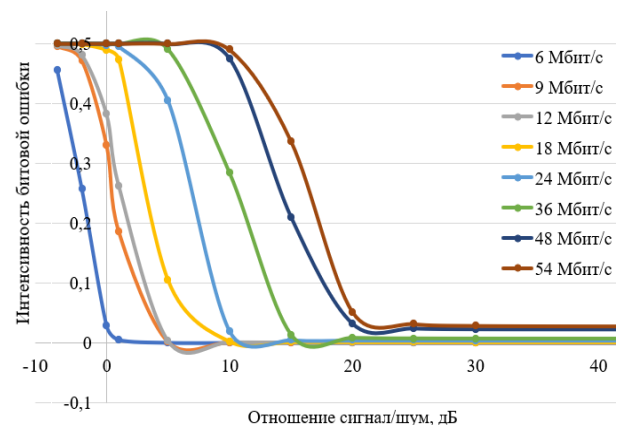


Рис. 4. Зависимость интенсивности появления битовых ошибок от отношения сигнал / шум для разных скоростей в стандарте 802.11a

**Заключение.** Полученные в ходе моделирования данные позволили провести оценку интенсивности появления битовой ошибки на разных скоростях



для разного уровня шума, а также найти соотношение сигнал / шум, при котором интенсивность появления битовой ошибки стремится к нулю для каждой из возможных скоростей.

После проведения эксперимента было установлено, что для уменьшения интенсивности возникновения ошибки (для сохранения качества передачи) при увеличении скорости необходимо либо увеличивать мощность передатчика, либо уменьшать уровень побочных шумов.

#### *Литература*

1. Альбекова З.М., Квашурич В.О., Тутик Н.А. Анализ эволюции технологии беспроводных сетей и прогнозы развития инфокоммуникационных сетей в России // Инженерный вестник Дона. – 2016. – Т. 43, № 4 (43).

2. Коптев Д.С., Щитов А.Н., Шевцов А.Н. Сравнительный анализ наиболее перспективных стандартов беспроводных сетей связи // Междунар. журнал гуманитарных и естественных наук. – 2016. – Т. 3, № 1.

3. Mikulka J., Hanus S. CCK and barker coding implementation in IEEE 802.11 b standard // 2007 17th International Conference Radioelektronika. – IEEE, 2007. – P. 1–4.

4. Прокопайло А.А., Ганжур М.А. Двоичное пакетное свёрточное кодирование // Интеграция наук. – 2018. – № 8. – С. 416–418.

5. Pollet T., Van Bladel M., Moeneclaey M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise // IEEE Transactions on communications. – 1995. – Т. 43, № 2/3/4. – P. 191–193.

---

**Сысолина Мария Алексеевна**

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: sysolina.masha@mail.ru

**Аврамчук Валерий Степанович**

Д-р техн. наук, проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: avramchukvs@mail.ru

УДК 621.396.41

К.И. Цимбалов, Д.С. Брагин

## Анализ способов нарушения информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами

Описаны проблемы защиты автоматизированных систем управления технологическими процессами от несанкционированных воздействий со стороны злоумышленника. Рассмотрены и проанализированы утилиты для нарушения информационной безопасности АСУ ТП. Предложена структурная схема лабораторного стенда, имитирующего работу АСУ ТП, с целью в дальнейшем его практической реализации и апробации атак, с применением рассмотренных утилит.

**Ключевые слова:** АСУ ТП, MODBUS, Wireshark, Xerosploit, Goldeneye.

Опираясь на данные компании Infowatch [1], в 2020 г., ввиду пандемии коронавирусной инфекции и как следствие массового перехода на удаленный режим работы, произошел рост компьютерных атак на автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Всего же, по данным [2], в 2020 г. было обнаружено на 25% больше уязвимостей, чем в 2021 г.

Так, в декабре 2020 г. была атакована система управления водохранилищем в Израиле [3]. Система визуализации была подключена к сети Интернет без использования средств защиты. Исходя из этого, злоумышленники легко смогли получить доступ к инфраструктуре АСУ ТП.

Также нельзя оставить без внимания инцидент, произошедший в г. Олдсмар в США [4]. Злоумышленник получил доступ к системе управления станцией очистки воды и попытался увеличить уровень гидроксида натрия более чем в 100 раз, что могло привести к массовому отравлению людей.

Опираясь на данные факты, можно сделать вывод о том, что проблема защиты АСУ ТП является актуальной на текущий момент.

### Проблема защищенности АСУ ТП

Большинство угроз для рассматриваемой инфраструктуры связаны со злоумышленником, имеющим доступ к каналу связи, а также с проблемами в протоколе передачи [5, 6].

Опираясь на эти факты, можно выделить такой классифицирующий признак атак, как механизм осуществления атаки.

Таким образом, атаки на рассматриваемую инфраструктуру можно разделить на три группы:

- атаки, направленные на эксплуатацию человеческого фактора;
- атаки, направленные на использование уязвимостей протоколов;
- атаки, направленные на использование уязвимостей оборудования.

### Атаки, направленные на эксплуатацию человеческого фактора

К такому типу атак можно отнести социальную инженерию и атаку на основе радужных таблиц [7].

Под социальной инженерией понимаются психологические воздействия на операторов (персонал) информационной системы с целью выяснения

заведомо конфиденциальной информации о системе, типе ее функционирования и о составе в целом. В результате реализации данной атаки злоумышленник может получить как частичный, так и полный контроль над работой системы и вывести ее из работоспособного состояния, в конечном итоге произведя аварийную ситуацию.

Радужные таблицы – это предварительно рассчитанные хэши, которые используются для очень быстрого восстановления паролей из добытого хэша. Они представляют собой базы данных, в которых каждому паролю соответствует определенный вычисленный хэш [7].

Важно отметить, что вычисление радужных таблиц занимает ровно столько же времени, сколько и перебор пароля с помощью атаки методом грубой силы [8]. Однако поиск по созданной радужной таблице занимает доли секунды. Исходя из этого, в случае, если оператором информационной системы будет задан пароль, который не будет достаточно сложным, злоумышленник может просто подобрать пароль.

### Атаки, направленные на использование уязвимостей протоколов

К такому виду атак можно отнести DoS-атаки и атаку TCP-Reset.

DoS-атаки – это разновидность атак, предназначенных для компьютера или сети, результат реализации которых приводит к отказу в обслуживании.

Атаки DoS достигают этого, наполняя цель трафиком или отправляя ей информацию, которая вызывает сбой [9].

В обоих случаях DoS-атака лишает пользователей службы или ресурса, на которые они рассчитывали.

Выделяют два основных метода DoS-атак: Flood-сервисы или Crash-сервисы.

Популярными модификациями атак являются:

- атаки переполнения буфера – отправка на сетевой адрес больше трафика, чем заложено в системе обработки;
- ICMP flood-атаки, направленные на «устранение» неправильно настроенных сетевых устройств, отправляя поддельные пакеты, которые проверяет каждый компьютер в целевой сети, затем сеть запускается для увеличения трафика;
- SYN flood-атаки, направленные на отправку запросов на подключение к серверу, но никогда не завершающие рукопожатие.

Это продолжается до тех пор, пока все открытые порты не будут заполнены запросами и ни один из них не станет доступным для подключения законным пользователям.

Атака TCP-Reset основывается на флаге «сброс» в TCP-пакетах, который указывает на то, что соединение разорвано (рис. 1).

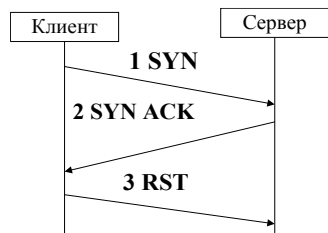


Рис. 1. Схема отключения

Исходя из того, что злоумышленник может подделать TCP-пакеты, в результате реализации данной атаки может произойти отказ в возможности использования сетевых служб на основе TCP для пользователей.

Важно отметить, что для реализации текущей атаки злоумышленник должен знать IP-адреса, номера портов и порядковый номер текущего TCP-соединения.

#### Атаки, направленные на использование взаимностей оборудования

К такому типу атак можно отнести аппаратные закладки в устройстве управления, с помощью которых можно как произвести несанкционированный съем информации, так и внести изменения в алгоритм работы конкретной системы управления.

#### Структурная схема лабораторного стенда, имитирующего работу АСУ ТП

На рис. 2 приведена структурная схема лабораторного стенда, имитирующего работу АСУ ТП.

В схеме отражены интерфейсы и протоколы передачи между датчиками, программируемым логическим устройством и SCADA-системой соответственно.

Как видно из рис. 2, предложенная схема АСУ ТП состоит из датчиков и соленоидного клапана, которые связаны с программируемым логическим контроллером посредством интерфейса RS-485.

Аналоговые сигналы от датчиков передаются с уровнями 0...20 мА.

Также программируемый логический контроллер связан с сенсорным монитором оператора по интерфейсу RS-232.

Все данные с датчиков поступают на вход ПЛК с целью их обработки и передачи в OPC MODBUS-сервер по протоколу MODBUS RTU [10].

Данные с сервера поступают в SCADA-систему для контроля и управления технологическим процессом.

Исходя из предложенной инфраструктуры, возможна реализация двух сценариев атаки.

При первом сценарии атаки злоумышленник может подключиться к OPC-серверу и отправлять на него различные запросы, в результате чего произой-

дет отказ в обслуживании со стороны OPC-сервера и как следствие пропадет возможность как контроля показаний датчиков, так и взаимодействия с ПЛК.

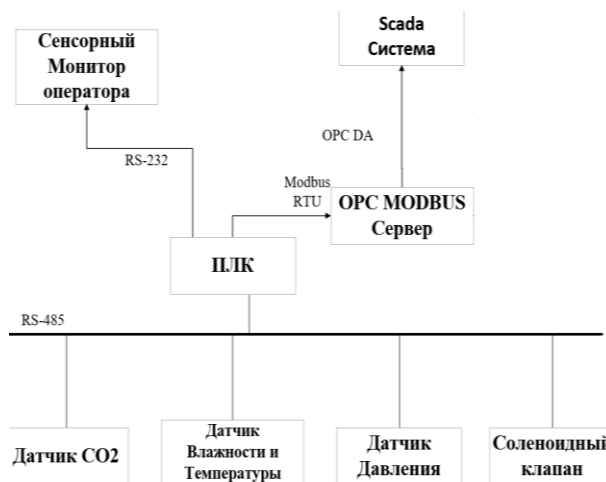


Рис. 2. Схема АСУ ТП

При втором сценарии атаки злоумышленник может снимать кадры данных, которые передаются от ПЛК в OPC-сервер. В результате появляется возможность либо искажения передаваемой информации, либо подмены данных.

Утилиты, с помощью которых возможна реализация представленных сценариев атак, будут далее рассмотрены в текущей работе.

#### Утилита Wireshark

Текущая утилита позволяет производить анализ трафика, проходящего через заданный сетевой интерфейс [11]. В утилите реализована возможность фильтрации трафика с подключением внешних скриптов, что позволяет оперативно перехватывать необходимые данные из канала связи.

Применяя данную утилиту, злоумышленник может подключиться к каналу связи на уровне ПЛК, а затем влиять на параметры технологического процесса.

#### Утилита Xerosploit

Данная утилита является инструментом тестирования сети на проникновения [12]. Она основана на утилитах «besttcp» [13] и «nmap» [14], что позволяет оперативно определять открытые порты, а также производить атаки типа отказ в обслуживании.

Применение текущей утилиты на предложенную инфраструктуру АСУ ТП позволит отключить OPC MODBUS-сервер.

Как следствие, нарушится связь между программируемым логическим устройством и SCADA-системой.

#### Утилита GoldenEye

Текущая утилита позволяет в большом количестве посылать HTTP запросы, реализуя атаку отказ в обслуживании.

Так как оператору АСУ ТП требуется пройти аутентификацию для входа в систему управления, даже не зная пароля, злоумышленник, используя текущую утилиту, может многократно отправить поддельные запросы на аутентификацию.

В результате реализации данной атаки интерфейс SCADA-системы может перейти в состояние отказ в обслуживании.

### Сравнение утилит для нарушения информационной безопасности АСУ ТП

На основании рассмотренных в текущей работе утилит, с помощью которых можно нарушить информационную безопасность, в таблице приведено сравнение применимости утилит к предложенной инфраструктуре АСУ ТП.

#### Сравнение утилит для нарушения информационной безопасности АСУ ТП

Критерий для сравнения	Wire-shark	Xero-splloit	Golden-Eye
Возможность перехвата данных из канала связи	+	-	-
Возможность подключения дополнительных программных модулей	+	+	-
Возможность реализации атаки DoS	-	+	+
Возможность влияния на интерфейс аутентификации пользователя	+	-	+
Возможность расшифровки перехваченной информации	-	-	-
Возможность влияния на OPC-сервер	+	+	-

В соответствии с таблицей оптимальной утилитой для нарушения информационной безопасности, предложенной инфраструктуры АСУ ТП, является утилита Wireshark, так как в ней имеется возможность перехвата данных с последующей возможностью модификации.

Из недостатков данной утилиты можно отметить отсутствие возможности проведения операции расшифровки данных, в случае если перехваченные кадры будут в зашифрованном виде. Также с помощью текущей утилиты возможно лишь детектировать атаку отказ в обслуживании, а не производить непосредственную реализацию.

Утилиты Xerosploit и GoldenEye целесообразно использовать для проведения атак отказ в обслуживании.

#### Заключение

В ходе текущей работы была актуализирована проблема защиты автоматизированных систем управления технологическими процессами от воздействий злоумышленников.

Были рассмотрены и проанализированы утилиты для нарушения информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами.

По результатам анализа было принято решение использовать утилиту Wireshark для проведения атак на лабораторный стенд.

Дальнейшим этапом работы будет практическая реализация лабораторного стенда, имитирующего работу АСУ ТП, с целью практической реализации атак, нарушающих информационную безопасность.

#### Литература

1. Обзор инцидентов с АСУ ТП за 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infowatch.ru/analytics/daydzhesty-i-obzory/kiber-bezopasnost-asu-tp-issledovanie-intsidentov-za-2020-g>, свободный (дата обращения: 09.09.2021).
2. First Claroty ICS vulnerability report identifies risks to ot networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.claroty.com/2020/08/19/first-claroty-ics-vulnerability-report-identifies-risks-to-ot-networks>, свободный (дата обращения: 09.09.2021).
3. Even N. What We've Learned from the December 1st Attack on an Israeli Water Reservoir? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.otorio.com/blog/what-we-ve-learned-from-the-december-1st-attack-on-an-israeli-water-reservoir>, свободный (дата обращения: 09.09.2021).
4. Vera A., Lynch J., Carrega C. Someone tried to poison a Florida city by hacking into the water treatment system, sheriff says [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amp.cnn.com/cnn/2021/02/08/us/oldsmar-florida-hack-water-poison/index.html>, свободный (дата обращения: 09.09.2021).
5. Lamshöft K., Dittmann J. Assessment of Hidden Channel Attacks: Targeting Modbus/TCP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/350915356\\_Assessment\\_of\\_Hidden\\_Channel\\_Attacks\\_Targeting\\_ModbusTCP](https://www.researchgate.net/publication/350915356_Assessment_of_Hidden_Channel_Attacks_Targeting_ModbusTCP), свободный (дата обращения: 10.09.2021).
6. Bashendy M., Eltanbouly S. Design and Implementation of Cyber-Physical Attacks on Modbus/TCP Protocol [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/351581650\\_Design\\_and\\_Implementation\\_of\\_Cyber-Physical\\_Attacks\\_on\\_ModbusTCP\\_Protocol](https://www.researchgate.net/publication/351581650_Design_and_Implementation_of_Cyber-Physical_Attacks_on_ModbusTCP_Protocol), свободный (дата обращения: 10.09.2021).
7. Zhang L., Tan C., Yu F. An improved rainbow table attack for long passwords // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 107. – P. 47–52.
8. Tasevski P. Password Attacks and Generation Strategies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/284609462\\_Password\\_Attacks\\_and\\_Generation\\_Strategies](https://www.researchgate.net/publication/284609462_Password_Attacks_and_Generation_Strategies), свободный (дата обращения: 10.09.2021).
9. Sanodiya R.K. DoS attacks: A simulation study // 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). – IEEE, 2017. – С. 2553–2558.
10. Tamboli S. et al. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process // 2015 international conference on smart technologies and management for computing, communication, controls, energy and materials (ICSTM). – IEEE, 2015. – P. 258–263.
11. Tanner N.H. Cybersecurity Blue Team Toolkit. – Wiley, 2019.
12. Xerosploit. – Режим доступа: <https://kali.tools/?p=3174>, свободный (дата обращения: 11.09.2021).
13. Bettercap. – Режим доступа: <https://kali.tools/?p=3870>, свободный (дата обращения: 11.09.2021).
14. Nmap. – Режим доступа: <https://kali.tools/?p=1317>, свободный (дата обращения: 11.09.2021).

#### Цимбалов Кирилл Игоревич

Студент каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: k.tsimbalov@yandex.ru

#### Брагин Дмитрий Сергеевич

Нач. науч.-техн. отд. Центра системного проектирования ТУСУРа  
Эл. почта: bds@csp.tusur.ru

К.И. Цимбалов, В.А. Фаерман

## Моделирование атаки «отказ в обслуживании» на беспроводные локальные сети семейства IEEE 802.11

Работа посвящена созданию простой имитационной модели на базе сети массового обслуживания, воспроизводящей фактическую зависимость времени отказа точки доступа от интенсивности атаки аутентификации. В рамках работы обсуждаются и обосновываются допущения, принимаемые при разработке модели. Валидация модели производится в ходе имитационного эксперимента. Соответствие результатов показывает корректность принятых допущений и адекватность модели в целом.

**Ключевые слова:** DoS-атака, WLAN, MDK3, Rockwell Arena, модель массового обслуживания.

На сегодняшний день беспроводные сети стали неотъемлемым атрибутом жизни современного человека. Так, в [1] предсказывалось, что мобильные сети охватят большинство урбанизированных регионов в мире уже до 2020 г.

Согласно актуальной статистике [2], сегодня доступ к мобильным сетям связи имеют около 4 млрд человек. Развитие беспроводной связи не ограничивается развитием мобильной инфраструктуры. Всё более важное значение в повседневной жизни и экономике имеют беспроводные локальные (WLAN) и персональные (WPAN) сети.

Как мировая [3], так и российская [4, 5] статистика демонстрирует динамичный прирост числа точек доступа в эксплуатации.

Одной из значимых тенденций развития WLAN в России и мире является рост числа общедоступных публичных сетей [6, 7]. К сожалению, несмотря на схожие тенденции, в этой части российский опыт качественно отличается от мирового.

Так, в соответствии с данными в [7], популярность общедоступных сетей в России существенно снижается в последние годы. Среди ключевых причин обозначаются их низкая надёжность, проблемы с безопасностью, а также сложность авторизации и обилие рекламы.

Проблема обеспечения надёжности, безопасности и доступности, публичных WLAN является одной из приоритетных задач профильных комитетов в рамках Wi-Fi Alliance.

Отметим также, что развитие беспроводной связи и распространение IoT делает всё более важным проектирование систем защиты локальной сетевой инфраструктуры [8].

При этом необходимость обеспечения надёжности является ключевым вызовом [9], связанным, в том числе, с принципиальной уязвимостью локальных беспроводных сетей к атакам типа «отказ в обслуживании».

Изучению последнего вопроса посвящена настоящая работа. В её рамках предложена простая имитационная модель атаки на беспроводную инфраструктуру и проведена серия экспериментов, показывающих валидность модели.

### Проблема надёжности WLAN

Принципиальной особенностью беспроводных сетей является невозможность ограничения доступа к среде передачи.

Уже это делает WLAN принципиально уязвимым к атакам, основанным на засорении эфира (так называемый jamming).

Однако наряду с общими для всех беспроводных сетей уязвимостями [10] в действующих стандартах семейства IEEE 802.11 присутствует ряд специфических особенностей, существенно упрощающих задачу злоумышленника по дестабилизации сети.

Наиболее распространённой и критичной, по мнению специалистов WiFi Alliance [9], является атака, основанная на интенсивной генерации злоумышленником ложных пакетов авторизации (authentication request flooding). Основные факторы, делающие эту атаку наиболее значимой, состоят в следующем:

- она проста в реализации и хорошо автоматизирована (в частности, в утилите MDK3);
- она гарантированно приводит к полному нарушению доступности сети;
- любая точка доступа, соответствующая существующим стандартам IEEE 802.11, неизбежно ей подвержена;
- в ряде случаев в результате атаки происходит отказ (hardreset) точки доступа, что делает сеть недоступной в течение длительного времени после завершения атаки.

Необходимо отметить, что данная атака продолжительное время исследуется в литературе [11–13].

За более чем 15 лет были предложены различные подходы к повышению устойчивости WLAN к ней, в частности, метод контрольных сумм в [14] и метод временного окна в [15]. Тем не менее ни один из этих подходов не оказался включен в стандарт.

При этом перспективный стандарт WPA3 рассматривает решение этой проблемы, однако у ряда исследователей остаются вопросы и к нему [16].

### Принцип реализации атаки

Аутентификация – это процедура, в ходе которой точка доступа и беспроводной клиент идентифицируют друг друга. В соответствии со стандартом IEEE 802.11, только клиенты, прошедшие аутентификацию, могут быть ассоциированы с точкой доступа и, следовательно, пользоваться услугами беспроводной сети. Аутентификация является обязательной процедурой как в открытых, так и в защищённых сетях. В настоящее время практически все как частные, так и

общедоступные сети, являются защищёнными [7]. При этом в подавляющем большинстве используются стандарты шифрования WPA-PSK или WPA2-PSK [7].

Процедура аутентификации в таких сетях является четырёхэтапной (four-way handshake), схема которой представлена на рис. 1.

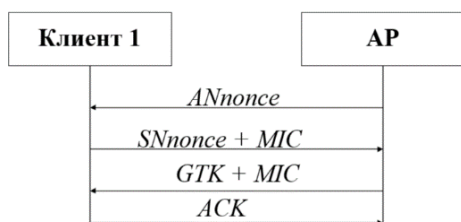


Рис. 1. Четырёхэтапная процедура аутентификации

Авторизация основана на том, что и точка доступа, и клиент априорно владеют информацией об общем ключе (preshared key), который используется в дальнейшем. В ходе рукопожатия устройства генерируют сессионные ключи, обмениваются произвольными сообщениями, удостоверяясь в возможности контрагента корректно зашифровать их. Ни общий ключ, ни сессионные ключи никогда не транслируются в эфир.

Ввиду того, что доступ к эфиру не может быть ограничен, любой беспроводной клиент в зоне доступа может инициировать процедуру аутентификации. Для того чтобы эта процедура могла быть впоследствии успешно завершена, точка доступа должна хранить в собственной памяти некоторый объём информации (ANonce, SNonce) [17].

Пользуясь этим обстоятельством, злоумышленник может многократно инициировать процедуру авторизации, подменяя при этом MAC-адрес отправителя. Точка доступа при этом вынуждена будет резервировать всё больший объём памяти для того, чтобы хранить информацию о каждом из инициированных запросов. Это может привести к отказу точки доступа ввиду истощения доступного объёма памяти.

В случае если точка доступа имеет ограничение на число записей в таблице аутентификации, то отказа не произойдет.

Однако при этом она утратит возможность принимать запросы авторизации от легальных пользователей. Таким образом, так или иначе сеть перестанет быть доступной.

**Имитационная модель атаки**

Ниже на рис. 2 представлена логическая структура сети. В ней присутствуют следующие компоненты:

- *клиенты* – устройства, которые генерируют трафик и обмениваются им друг с другом;
- *точка доступа* – выступает беспроводным хабом, который организует трафик между клиентами, а также обрабатывает запросы авторизации;
- *злоумышленник* – генерирует запросы авторизации, для того чтобы дестабилизировать работу сети;
- *эфир* – разделяемый ресурс в рассматриваемой сети массового обслуживания.

Важным аспектом, с точки зрения моделирования атаки, является выделение памяти точкой доступа.

Память точки доступа расходуется на буферизацию исходящих из неё сообщений (в случае, если эфир занят в момент предполагаемой отправки), а также на хранение таблицы аутентификации.

**Компьютерный эксперимент**

Для реализации имитационной модели использовалась среда дискретно-событийного моделирования Rockwell Arena [18]. При создании модели был сделан ряд допущений относительно стандарта IEEE 802.11 и работы сети в целом:

- клиенты обмениваются только кадрами данных, содержащими максимально допустимый объём (4096 байт) без агрегации [19];
- технология CSMA/CA с подтверждением реализована упрощённо и не использует процедуру обратного отчёта временных слотов (backclocking);
- коллизии в сети считаются маловероятными и исключаются моделью.

Представленные допущения не должны оказать существенного влияния на результаты моделирования, поскольку соответствуют сценарию функционирования малой сети с низкой интенсивностью трафика. Интенсивность трафика в модели составляет 10% от номинальной пропускной способности сети IEEE 802.11b в инфраструктурном режиме (скорость передачи данных 2 Мбит/с). Общий вид реализованной модели представлен на рис. 3.

В табл. 1 представлены данные, полученные в ходе моделирования. Варьируемым параметром выступила интенсивность атаки, отражающая число кадров аутентификации, которые злоумышленник генерировал ежесекундно.

Как видно из табл. 1, при увеличении интенсивности атаки время отказа уменьшается. Более детально характер зависимости обсуждается далее.

Таблица 1

**Данные, полученные в ходе моделирования**

Точка доступа	Интенсивность атаки, пак/с	Время «отказа» точки доступа, с
Имитационная модель	75	105
	100	88
	150	66
	200	46
	300	35
	400	29
	450	29
	500	26
	750	19
1000	17	

**Натурный эксперимент**

С целью валидации модели был проведён натурный эксперимент. В ходе эксперимента целью атаки выступали различные точки доступа, представленные на рис. 4. Для атаки во всех экспериментах использовался Wi-Fi-адаптер ASUS N-300, поддерживающий режим монитора и инъекцию пакетов, представленный на рис. 5.

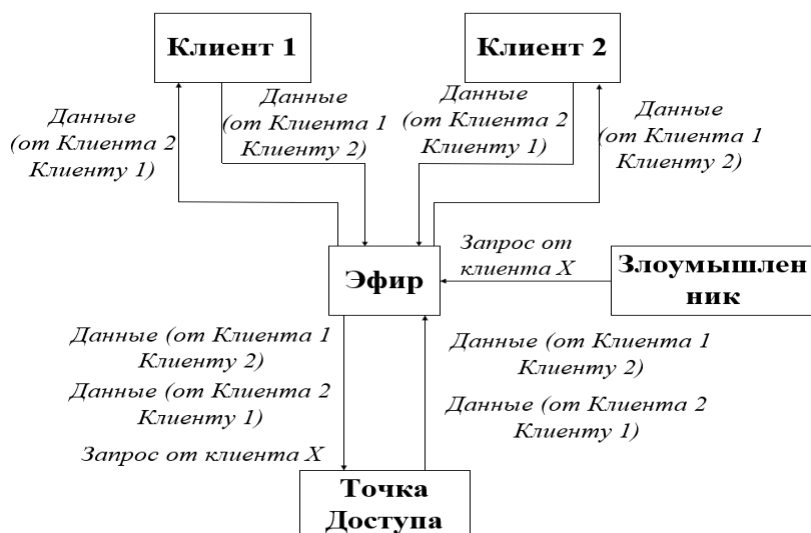


Рис. 2. Структурная схема модели

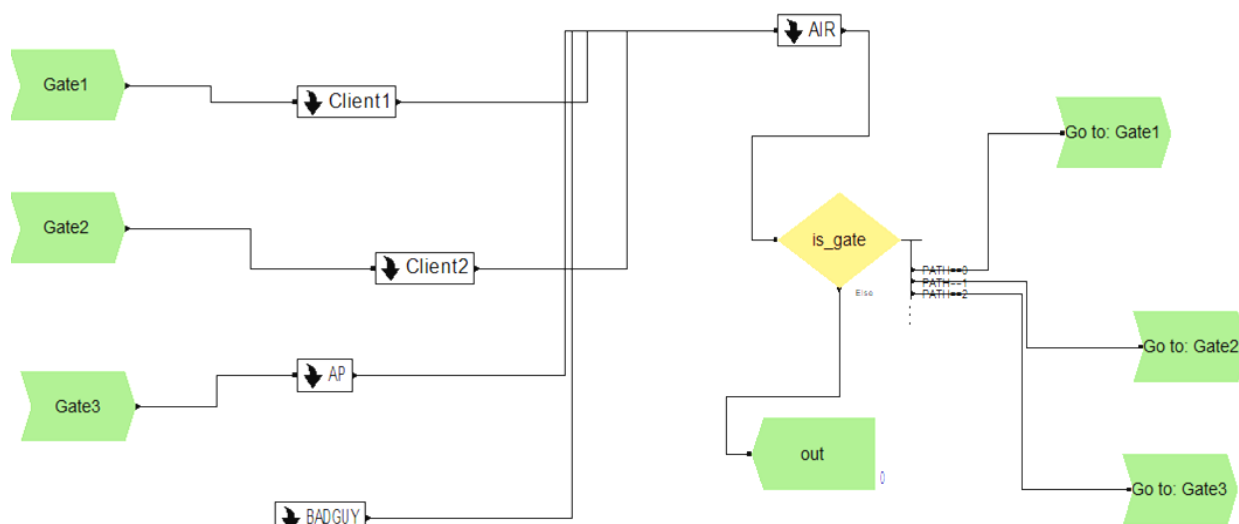


Рис. 3. Общий вид модели

Атака осуществлялась применением утилиты MDK3 на Kali Linux [20]. От эксперимента к эксперименту изменялась её интенсивность с использованием штатного интерфейса утилиты MDK3.

Текущий статус доступности точки доступа оценивался путём отправки ICMP-пакетов по проводному каналу и фиксации соответствующих откликов. Отсутствие реакции устройства на запрос интерпретировалось как его отказ.



Рис. 4. Атакуемые точки доступа



Рис. 5. Wi-fi-адаптер

По результатам атак были получены данные, которые представлены в табл. 2. Необходимо отметить, что оценки времени представлены для устройств Dlink Dir-300 и Dlink DAP 1155.

Характер зависимости для других устройств качественно не отличается. Исключения представляет Keenetic KN-1211, который в ходе атаки переставал воспринимать запросы на аутентификацию и, следовательно, не отказывал.

**Сравнение результатов**

На основании данных из табл. 1 и 2 была построена зависимость времени отказа от интенсивности атаки (рис. 6).

Таким образом, существует обратная зависимость между временем до отказа точки доступа и интенсивностью атаки.

Сопоставляя графики, полученные в ходе компьютерного и натурального экспериментов, можно констатировать их качественное соответствие. Количественные ограничения могут быть обусловлены ошибкой в оценке фактически доступной памяти устройств.

Таблица 2

Данные полученные с помощью утилиты MDK

Точка доступа	Год выпуска	Цена	Интенсивность атаки, пак/с	Время «отказа» точки доступа, с	Точка доступа	Год выпуска	Цена	Интенсивность атаки, пак/с	Время «отказа» точки доступа, с
Dlink Dir 300	2010	1500 руб.	75	88	Dlink DAP 1155	2010	975 руб.	75	77
			100	76				100	64
			150	51				150	44
			200	40				200	35
			300	30				300	25
			400	25				400	20
			450	22				450	18
			500	19				500	15
			750	15				750	10
			1000	11			1000	5	

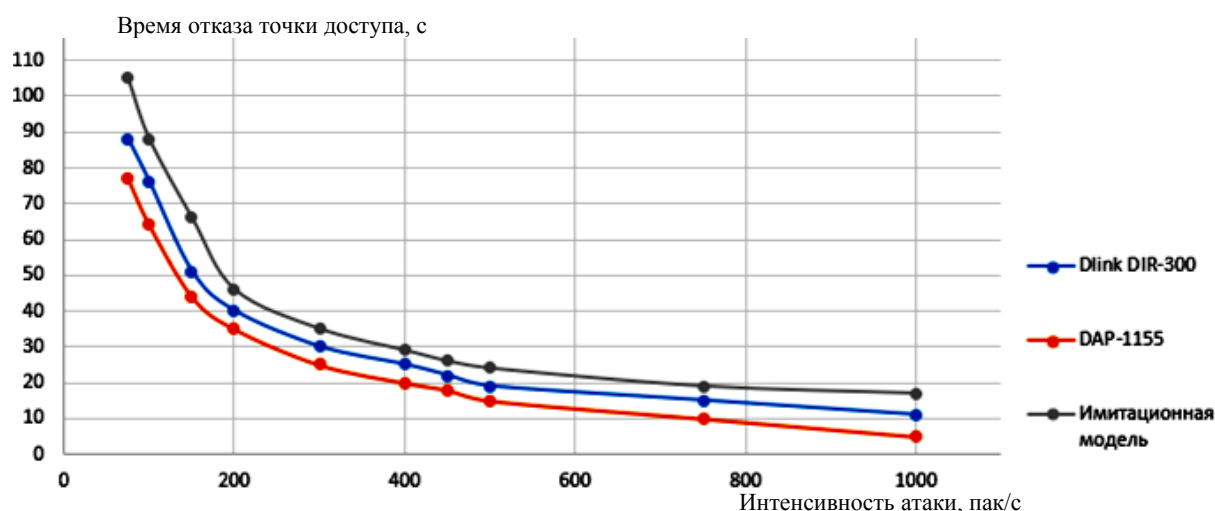


Рис. 6. Зависимость времени отказа от интенсивности атаки

**Заключение**

Предложенная модель, основанная на сети массового обслуживания, качественно воспроизводит зависимость времени до отказа точки доступа от интенсивности атаки. С незначительными модификациями данная модель может быть использована для оценки влияния атак «отказ в обслуживании» на распределение времени задержки кадров. Кроме этого, на основе данной модели может быть произведена оценка мер противодействия таким атакам, не реализуемых в рамках стандарта IEEE 802.11 и, следовательно, не воспроизводимых с помощью существующего оборудования.

*Литература*

- Riihijärvi J., Mähönen P. Spatial statistics for wireless networks research // Procedia Environmental Sciences. – 2011. – Vol. 7. – P. 86–91.
- Measuring digital development Facts and figures [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- <https://www.itu.int/en/ITU/Statistics/Documents/facts/Facts Figures2020.pdf>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
- Alsop T. WLAN-connected devices worldwide 2016–2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/802706/world-wlan-connected-device/>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
- Ализар А. Мировая статистика использования WiFi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xaker.ru/2015/06/26/wifi-stat/>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
- Татарников О., Развитие беспроводных сетей в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://compress.ru/article.aspx?id=10843>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
- О популярности общественных Wi-Fi-сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.rbc.ru/rbc\\_freeneews/5aa652c29a7947074da3c494](https://www.rbc.ru/rbc_freeneews/5aa652c29a7947074da3c494), свободный (дата обращения: 12.06.2021).
- Public Wi-Fi Usage Survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.idtheftcenter.org/images/surveys\\_studies/PublicWiFiUsageSurvey.pdf](https://www.idtheftcenter.org/images/surveys_studies/PublicWiFiUsageSurvey.pdf), свободный (дата обращения: 12.06.2021).



8. Shelupanov A., Konev A., Kosachenko T., Dudkin D. 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.
9. Wi-Fi Summary [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wi-fi.org/who-we-are/current-work-areas>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
10. Шелупанов А.А., Евсюгин О.О., Конев А.А., Костюченко Е.Ю., Кручинин Д.В., Никифоров Д.С. Актуальные направления развития методов и средств защиты информации // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 11–24.
11. Liu C., Yu J. A Solution to WLAN Authentication and Association DoS Attacks // IAENG International Journal of Computer Science. – 2007. – Vol. 34, № 1.
12. Elhigazi A. et al. Authentication Flooding DOS Attack Detection and Prevention in 802.11 // 2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). – IEEE, 2020. – P. 325–329.
13. Ferreri F., Bernaschi M., Valcamonici L. Access points vulnerabilities to DoS attacks in 802.11 networks // 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No. 04TH8733). – IEEE, 2004. – Vol. 1. – P. 634–638.
14. Arockiam L. et al. A solution to prevent resource flood-ing attacks in 802.11 WLAN // International Conference on Computing and Communication Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 607–616.
15. Arockiam L. et al. A solution to prevent resource flood-ing attacks in 802.11 WLAN // International Conference on Computing and Communication Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 607–616.
16. Lounis K., Zulkernine M. WPA3 Connection Deprivation Attacks // International Conference on Risks and Security of Internet and Systems. – Springer, Cham, 2019. – P. 164–176.
17. He C., Mitchell J. C. Analysis of the 802.11 i 4-Way Handshake // Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Wireless Security. – 2004. – P. 43–50.
18. Система имитационного моделирования Arena [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.ru/cm/arena.htm>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
19. 802.11 Frame Types and Formats [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://howiwifi.com/2020/07/13/802-11-frame-types-and-formats/>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).
20. Mdk3 Package Description [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tools.kali.org/wireless-attacks/mdk3>, свободный (дата обращения: 12.06.2021).

---

**Цимбалов Кирилл Игоревич**

Студент каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: k.tsimbalov@yandex.ru

**Фаерман Владимир Андреевич**

Ст. преп. каф. КИБЭВС ТУСУРа, член IEEE  
ORCID: 0000-0002-9643-0245  
Эл. почта: vaf@tpu.ru

УДК 621.396.41

И.Е. Вдовина

## Криптографическое искусство

Изучено понятие «криптоискусство». Рассмотрена значимость криптоискусства для художников и изучены основные криптографические принципы, которые при этом используются. Выделены часто встречающиеся атаки. Также проведен эксперимент по сертификации одного и того же изображения с разных аккаунтов.

**Ключевые слова:** блокчейн, NFT-токен, цифровое искусство, криптографическое искусство, атаки в криптоискусстве.

Художнику, который рисует в традиционном виде, несложно подтвердить подлинность своей работы. Для этого у него есть оригинальное полотно с картиной и его личная подпись на ней, также стиль рисования, который отображается в мазках, цветовой палитре, построении деталей и т.д. Конечно же, все это можно скопировать и выдавать за оригинал, поэтому часто картины проверяются на подлинность искусствоведами.

Как быть цифровому художнику? Цифровую картинку не проверить искусствоведам на подлинность. Также такие художники часто сталкиваются с проблемой кражи работ. Много случаев в сети, когда работу малоизвестного автора выдают за свою или выставляют изображения, которые загружены на закрытые сайты и не разрешаются к распространению, как общедоступный контент.

Для безопасности цифрового искусства было придумано криптоискусство. Что же это такое? Криптоартом, или криптоискусством, называется направление в современном изобразительном искусстве, использующее технологию блокчейн в формате невзаимозаменяемого токена.

Блокчейном называют технологию, которая чаще всего используется при работе с криптовалютами. Представляет собой распределенную базу данных, в которой хранится информация обо всех транзакциях участников системы в виде «цепочки блоков».

Невзаимозаменяемым токеном, или NFT, называется вид криптографических токенов, каждый экземпляр которых уникален и не может быть обменен или замещен другим аналогичным токеном, хотя обычно токены взаимозаменяемы по своей природе. В криптоискусстве NFT выступает в роли электронной цифровой подписи для цифрового изображения, с помощью которой можно подтвердить право на владение работой.

Итак, первая проблема, с которой столкнулись цифровые художники и люди, которые хотят купить у них работу, – это право собственности на цифровую работу. Для решения данной проблемы в 2014 г. был запущен сайт Monograph [2]. Принцип работы сайта заключался в том, что художник, зарегистрировавшись на сайте, мог отправить URL созданной картины, после чего получал ключ блокчейна и значение, которые хранятся в кошельке NameCoin. В результате получалось, что изображение выступало в качестве единичной криптовалюты.

Также данный сайт решает проблему выставления чужой работы за свою. При загрузке картинки, которая уже была загружена когда-то, Monograph обнаружит, что данное изображение уже было заявлено.

Так как сайт еще и является торговой площадкой, художник может передать права на изображение другому пользователю, таким образом продав его. В данной ситуации покупатель будет точно знать, что данное изображение принадлежит ему и является оригиналом.

В 2015 г. был запущен сервис Ascribe [3], который предоставляет такие же услуги, как Monograph, и обладает технологией, которая может бороться с незаконным распространением работ. Технология Ascribe на основе блокчейна может отслеживать путь любого файла, который был когда-либо добавлен в базу сервиса, что позволяет найти скопированную работу. Художник или владелец цифрового искусства может привлечь к ответственности того, кто незаконно распространил или украл работу.

Также в 2015 г. запускается служба Verisart [4], которая позволяет сертифицировать и документировать цифровые картины. С помощью сертификата можно в реальном времени посмотреть, кем и когда было создано изображение.

В настоящее время сайты для предоставления художникам возможности получать сертифицированные права на свои работы становится больше. Для художников это отличная возможность бороться с вечным копированием работ и распространением их в сети, где чаще всего сложно подтвердить свое авторство. Также нужно отметить, что для сертифицирования работ художнику необходимо подтверждать свою личность. При сертифицировании цифрового рисунка в обязательном порядке требуется указать автора работы, для чего художники заносят себя в базу данных создателей, в ходе чего они подтверждают свою личность и добавляют свою реальную подпись.

Теперь поговорим о технической части. В целом криптоискусство держится на принципах блокчейн-технологии, так как оно является своеобразной криптовалютой. Благодаря структуре блокчейна, обладателям какого-то цифрового изображения, представленного в виде криптографического искусства, легко отследить полную историю владельцев цифрового изображения.

Важнейшей составляющей блокчейна [9] являются транзакции, которые представляют собой ато-

марное изменение состояний системы. Из транзакций формируются блоки, которые и формируют тело блокчейна. Для целостной и безопасной работы блоки связаны лишь ссылками, при этом каждый блок ссылается лишь на предыдущий блок.

Отчет в блоках начинается с первого блока, называемого генезис, к которому не отсылается никакой другой блок. Генезис лишь является начальным звеном остальной цепочки. Ссылаются блоки на конкретный с помощью его заголовка, который хэшируется пару раз с помощью функции SHA-256.

Блоки в блокчейне состоят из заголовка блока, в котором хранятся ключевые параметры, такие как время создания, ссылка на предыдущий блок, корень дерева Меркла и список транзакций.

Новые транзакции создаются и находятся в соответствии с правилами, которые установлены в протоколе криптовалюты. Правила нужны для безопасности и решения ситуаций, при которых для формирования нового блока появляется несколько вариантов данных. Также нужно отметить, что новые блоки добавляются в цепочку после прохождения алгоритмов «доказательства работы» и «подтверждения доли».

На рис. 1 представлена схема алгоритма формирования новых блоков в блокчейне. С высоты  $i$  начинается формирование нового блока. «Блок  $B_i$ » и «Блок  $B'_i$ » означают, что в данный момент времени формирования блока существует несколько пользователей, заинтересованных в блокчейне, формируя таким образом свои данные. Дальнейшим действием будет согласование требований и выбор одной линейной ветки блоков с транзакциями.

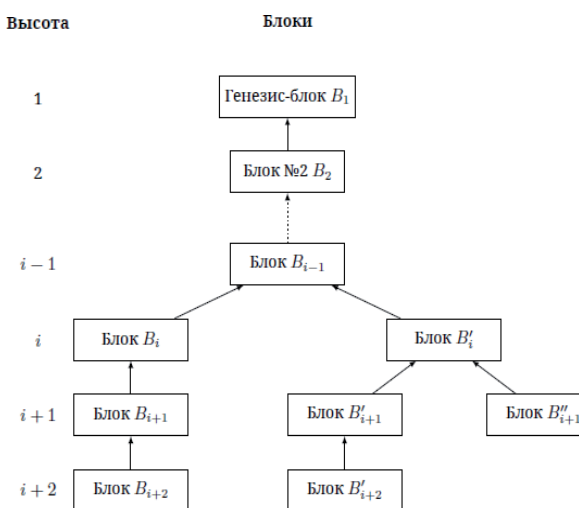


Рис. 1. Алгоритм создания нового блока в блокчейне

#### Алгоритм «доказательства работы»

Как было сказано выше, для ссылки на другой блок заголовок хэшируется два раза функцией SHA-256. Для того чтобы блок считался действительным, его ссылка должна соответствовать следующему неравенству:

$$\text{hash}(B) \leq M/D, \quad (1)$$

где  $D \in [1, M]$  – целевая сложность,  $M$  – конечное пороговое значение хеш-функции.

В можно найти лишь с помощью последовательного перебора по всем возможным заголовкам блока. Чем больше будет величина  $D$ , тем больше действий нужно произвести для нахождения нужного блока.

Определить время  $T(r)$ , за которое атакующий сможет найти действительный блок, можно с помощью формулы

$$P\{T(r) \leq t\} = 1 - \exp(-rt/D), \quad (2)$$

где  $r$  – операции в секунду.

Также нужно отметить, что для атаки злоумышленнику необходимо оборудование, которое будет обладать большой мощностью, иначе нахождение блока будет длиться бесконечно.

#### Алгоритм «подтверждения доли»

При подтверждении доли значимым параметром становится баланс пользователя, для этого используется условие, аналогичное (1):

$$\text{hash}(\text{hash}(B_{\text{prev}}), A, t) \leq \text{bal}(A)M/D, \quad (3)$$

где  $B_{\text{prev}}$  – блок, над которым работает пользователь,  $t$  – текущее время,  $A$  – адрес и  $\text{bal}(A)$  пользователя.

В отличие также от условия (1) пользователь способен иметь лишь время  $t$  левой части неравенства (3). Баланс адреса будет блокироваться протоколом. На параметр  $t$  ставятся ограничения. Например, если  $t$  не может отличаться от UTC-времени узлов сети больше чем на час, то пользователь может попробовать не более 7200 значений  $t$ . Это позволяет алгоритму «подтверждения доли» работать без вовлечения в него других вычислений.

После того как адрес  $A$  и время  $t$  будут удовлетворять неравенству (3), пользователь должен предоставить доказательства того, что он владеет адресом. Для этого ему нужно будет подписать новый блок с помощью своей цифровой подписи (в качестве секретного ключа, например, на сайте Verisart используется изображение в качестве подписи, которое загружается при регистрации художника).

После нахождения блок для адреса  $A$ , время которого рассчитывается экспоненциально с параметром  $\text{bal}(a)/D$ . После чего честным образом фиксируется сделка и заносится в базу данных.

#### Возможные атаки

Одной из наиболее частых атак считается переделывание блоков так, чтобы злоумышленнику блок стал выгоден. Примером атаки можно считать, когда атакующий после сделки отменяет транзакцию таким образом, что и получил, что хотел, и вернулся деньги. Данная атака требует оборудования высокой мощности.

Так называемая «Атака Сибиллы» – атака, при которой злоумышленник может заполнить сеть множеством узлов, которые он контролирует. Таким образом он владеет всеми соседними узлами сети с узлом жертвы. Благодаря этому злоумышленник:

- отсоединив пользователя от общей сети, блокирует транзакции с другими пользователями;
- создает свои блоки и подсоединяет жертву только к ним;
- способен увидеть все транзакции жертвы с помощью дополнительного ПО.

Уязвимости самого сервиса, где происходят транзакции, могут приводить к атакам. Примером этого можно считать атаку, произошедшую в июле 2021 г. на платформе Binance [8], связанную с продажей рисунка в виде NFT-токена «Wukong and Van Ging 18.0». Причиной взлома являлась уязвимость в платформе, при которой после подключения к зараженному Wi-fi злоумышленники получили доступ к устройству. У жертвы были выведены деньги с аккаунта через анонимный блокчейн. Проблемой Binance было то, что при продаже NFT-токена при сделке не требовалось никаких дополнительных подтверждений, вроде СМС, сообщения на почте с кодами или же ввода пароля.

### Эксперимент с сертификацией изображения

Цель эксперимента – узнать, как отреагирует система, если «злоумышленник» будет загружать работу точь-в-точь похожую на сертифицированную ранее или слегка измененную эту же работу.


Был зарегистрирован аккаунт «хорошего» художника на сайте Verisart [10]. Перед тем как сертифицировать работу, сайт требует отметить от лица кого идет сертификация. Для этого был добавлен в базу данных новый художник.

При добавлении в базу данных художника требовалось подтвердить свою личность. Также добавить информацию о себе и изображение со своей подписью (в дальнейшем подпись будет выступать в качестве закрытого ключа шифрования). На рис. 2 можно увидеть пункты, которые нужно заполнить при добавлении в базу данных художника. Нужно также отметить, что на сайте какое-то время длится подтверждение личности, после чего пользователь получает галочку. Галочка служит гарантией надежности для будущих сделок между настоящим и потенциальным обладателями сертификата на собственность некоего цифрового изображения.

Чтобы сертифицировать свои собственные творения, расскажите нам немного о себе

- ✓ **ПОДТВЕРДИТЕ СВОЮ ЛИЧНОСТЬ** ^
- Подтверждение личности сохранено
- ✓ **ХУДОЖНИК ИЛИ СОЗДАТЕЛЬ** v
- ✓ **ПОДПИСЬ СОЗДАТЕЛЯ** ^

Загрузите изображение для подписи  
Рекомендуемый размер: 50 x 300 пикселей.

 ЗАГРУЗИТЬ ФАЙЛ

**СОХРАНИТЬ**

Рис. 2. Подтверждение личности художника и добавление сведений о нем

Далее производилась сертификация изображения. Рисунок 3 – это цифровое изображение, на которое получался сертификат. Для сертификации нужно было заполнить данные о работе: название, тип работы, место хранения работы, год выпуска, размер

изображения, а также нужно загрузить само изображение и выбрать, кому оно будет принадлежать. Форму заполнения информации можно увидеть на рис. 4.



Рис. 3. Сертифицируемое изображение

ДЕТАЛИ ОБЪЕКТА

Заголовок: Maksim Demin

Тип объекта: Рисунок

Серверная копия хранится на жестком диске

Производственный год: 2021

Выбор: Передний

Пост: 369

Ширина: 338

Глубина: По умолчанию

Частный / Начальный

Рис. 4. Данные, которые нужно вписать при сертифицировании

После успешной сертификации будет уведомление о том, что сертификат успешно создан.

Также в аккаунте будут храниться все сертифицированные вами работы, как на рис. 5.

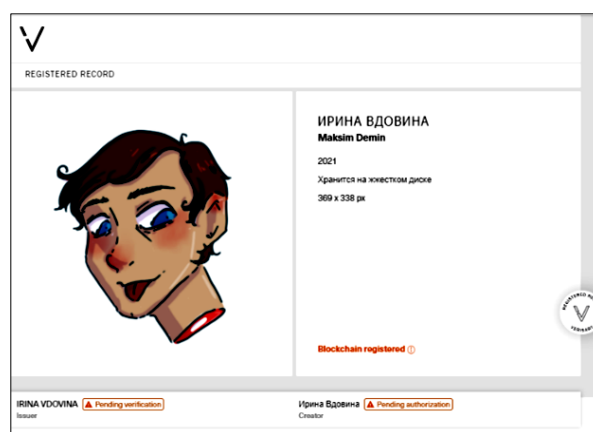


Рис. 5. Полученный сертификат на изображение

В созданном сертификате можно посмотреть его блокчейн, в котором будут описаны все транзакции изображения (рис. 6).

Как и в случае с подтверждением личности, администрация проверяет сам сертификат. Нужно подождать довольно длительное время, чтобы получить галочку о том, что сертификат верен. В данной ситуации два разных человека загрузили две одинаковые работы, сайт выдает сертификат двоим пользователям. Это можно увидеть на рис. 8, когда будет получен сертификат на ту же работу и похожие со второго аккаунта.

Далее был создан второй аккаунт на том же сайте, только теперь в качестве «плохого» художника. На новом аккаунте тоже был добавлен художник и подтверждена его личность.

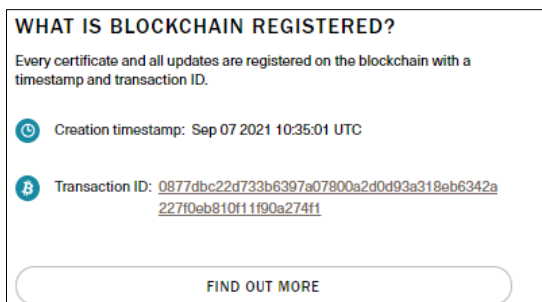


Рис. 6. Все транзакции сертифицированного изображения

В качестве сертификации была выбрана та же работа, но помимо точно такой же работы также были попытки сертифицировать слегка измененные изображения. На рис. 7, а показано изображение, где изменен цвет цели, а именно цвет глаз; на рис. 7, б – добавлены новые детали; на рис. 7, в – изменена цветовая палитра рисунка. На рис. 8 представлен результат сертификации изображений.



Рис. 7. Рисунки для сертификации от лица «плохого» художника

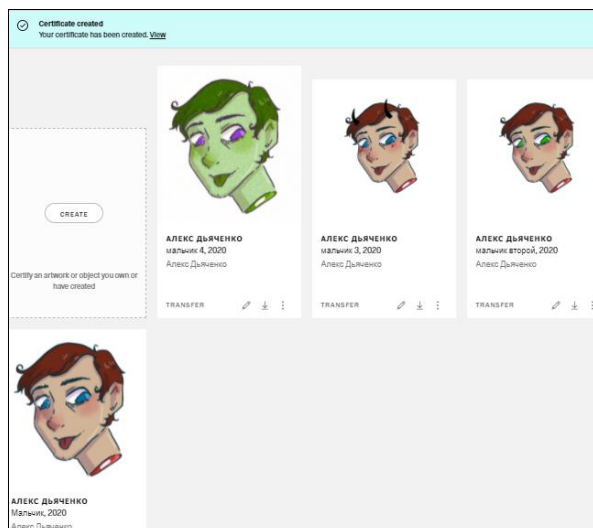


Рис. 8. Профиль второго пользователя с сертификатами

Подтверждение аккаунтов – длительный процесс. Через два дня на почту пришло сообщение о том, что ни на одном аккаунте не была подтверждена личность художника. Для этого попросили предоставить модераторам сайта последнюю выставку работ, чтобы подтвердить себя как художника. Данное сообщение пришло из-за того, что одинаковые работы сертифицировались с небольшой периодичностью по времени, от чего у администрации сайта появились вопросы.

На данный момент результаты эксперимента показывают, что идет ручная проверка сертификатов работ. Это очень длительное время, из-за чего можно

обмануть потенциального покупателя будущего фальшивого сертификата. Для решения подобной проблемы можно написать в техническую поддержку и привести администрации сайта доказательства того, что ваша работа загружена раньше. Данное доказательство делается при помощи характеристик сертификата, где отмечено точное время регистрации сертификата на определенную работу. Но проблема решается, если художник самостоятельно заметит мошенника.

### Заключение

Было рассмотрено такое понятие, как «криптографическое искусство». Рассмотрены первые три сайта, которые стали предоставлять художникам функцию сертификации их цифровых изображений. Также рассмотрены методы, используемые при сертификации, и проведен эксперимент с сертификацией цифрового изображения.

### Литература

1. Welcome to the weirdly wonderful world of crypto-art [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thenextweb.com/news/cryptocurrency-artist-graffiti/> (дата обращения: 05.07.2021).
2. Monegraph Uses Bitcoin Tech So Internet Artists Can Establish «Original» Copies Of Their Work [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://techcrunch.com/2014/05/09/monegraph> (дата обращения: 05.07.2021).
3. Ascribe is using Bitcoin's blockchain to help artists claim ownership of their work [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thenextweb.com/news/ascribe-is-using-bitcoins-blockchain-to-help-artists-claim-ownership-of-their-work/> (дата обращения: 05.07.2021).
4. Verisart Plans To Use The Blockchain To Verify The Authenticity Of Artworks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://techcrunch.com/2015/07/07/verisart-plans-to-use-the-blockchain-to-verify-the-authenticity-of-artworks/> (дата обращения: 05.07.2021).
5. This ethereum-based project could change how we think about digital art [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mashable.com/article/cryptopunks-ethereum-art-collectibles> (дата обращения: 05.07.2021).
6. He Sold A Digital «CryptoPunk» For \$7.5 Million. Now Figma CEO Dylan Field Is Ready To Move Into The «Metaverse» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.com/sites/alexkonrad/2021/03/18/figma-ceo-dylan-field-talks-cryptopunks-nft-beeple-metaverse/?sh=48182aff5a1d> (дата обращения: 05.07.2021).
7. What is cryptoart, how much does it cost and can you hang it on your wall? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.theguardian.com/culture/2021/mar/05/what-is-cryptoart-how-much-does-it-cost-and-can-you-hang-it-on-your-wall> (дата обращения: 05.07.2021).
8. Хакеры украли 193 000\$ через уязвимость в Binance. И могут украсть ещё [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://1k.com.ua/hakery-ukrali-193-000-cherez-uyazvimost-v-binance-i-mogut-ukrast-eshhjo.html> (дата обращения: 02.09.2021).
9. Технология блокчейн. Анализ атак, стратегия защиты. – 2017. – 67 с.
10. Verisart [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://verisart.com/> (дата обращения: 07.09.2021).

**Вдовина Ирина Евгеньевна**  
Студентка каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: blum1909@mail.ru

Е.М. Полещук, С.Е. Путилова, И.А. Щербинина

## Анализ уязвимостей и угроз информационной безопасности морских портов

Безопасное и эффективное функционирование информационной инфраструктуры является одной из ключевых задач, направленных на защиту национальных интересов в информационной среде. При этом необходимо, чтобы было налажено обоюдное сотрудничество между органами государственной безопасности и компаниями, которые располагают и управляют критическими объектами. Рассматриваются процессы погрузки, выгрузки и транспортировки контейнеров на морском транспорте, особенности их организации как критические процессы информационной инфраструктуры морских портов для последующего анализа уязвимостей и угроз информационной безопасности морских портов.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, морской транспорт, критическая информационная инфраструктура.

Транспорт играет важную роль в социально-экономическом развитии государства. Транспортная система обеспечивает условия экономического роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики и качества жизни населения. Качественные характеристики уровня транспортного обслуживания включают в себя следующие составляющие функционирования транспортной системы:

- скорость,
- своевременность,
- ритмичность,
- безопасность,
- экологичность [1].

В России предприятия транспортной отрасли попадают под действие Федерального закона № 187-ФЗ от 19 июля 2017 г. «О безопасности критической информационной инфраструктуры». При проведении работ по защите логистических процессов возникает необходимость в модернизации существующей инфраструктуры для поддержания высокого уровня информационной безопасности.

Информационная инфраструктура морских портов представляет собой совокупность информационно-технических средств, включающих требуемое математическое обеспечение, которые предназначены для организации процессов морских грузоперевозок. Ключевой интерес в данном вопросе представляют объекты инфраструктуры морских портов, так или иначе связанные с информационными технологиями. К таковым относятся:

- сети общего пользования;
- системы управления погрузкой и анализа движения контейнеров;
- системы обслуживания судов;
- системы управления терминалом;
- системы управления движением судов;
- системы швартовки судов и управления запорными механизмами;
- системы связи и коммуникации, навигационные системы;
- системы обслуживания и управления пассажирами;
- системы электронного документооборота;

- административные системы и сети;
- специализированные охранные системы, системы распознавания номеров контейнеров [2].

Весь массив потенциальных угроз безопасности информации морских портов можно разделить на два вида относительно природы их возникновения:

- естественные – факторы, не зависящие от действий человека, способные нарушить нормальное функционирование системы;
- искусственные – вызванные умышленной либо неумышленной деятельностью человека.

К источникам угроз информационной безопасности относятся:

- внутренние источники – структурные элементы системы, в том числе аппаратное и программное обеспечение, а также персонал;
- внешние источники – остальное [3].

Цели злоумышленников, реализующих угрозы безопасности информационной инфраструктуры морского порта, можно определить следующим образом:

- нарушение конфиденциальности;
- раскрытие паролей;
- анализ трафика;
- несанкционированный доступ;
- извлечение информации из базы данных;
- фальсификация документов;
- фишинг;
- несанкционированная передача данных;
- изменение настроек технологического оборудования или программного обеспечения;
- нарушение целостности;
- сбор и копирование данных;
- копирование и кража конфиденциальной информации;
- изменение данных и модификация информации;
- фальсификация документов;
- модификация программного обеспечения для обхода системы защиты;
- несанкционированное использование ресурсов;
- уничтожение оборудования, носителей или уничтожение данных;
- изменение информации в базе данных;

- нарушение доступности;
- несанкционированное использование информации;
- несанкционированное злоупотребление полномочиями для доступа в обход механизмов обеспечения безопасности;
- раскрытие паролей посредством кражи или визуального наблюдения;
- нарушение работоспособности всей системы, подсистем или отдельных компонентов объектов информационной инфраструктуры морского порта;
- возникновение проблем взаимной аутентификации;
- возникновение проблем конфиденциальности и целостности документов.

Способы реализации наиболее вероятных угроз безопасности информационной инфраструктуры морских портов:

1. Анализ сетевого трафика при его передаче между объектами информационной инфраструктуры морских портов; осуществляется с помощью прослушивания каналов связи для дальнейшего проведения анализа передаваемой информации между компонентами объектов информатизации морских портов для изучения топологии и архитектуры объекта инфраструктуры, а также выявления циркулирующих данных.

2. Изменение, искажение и модификация данных, обрабатываемых объектами информационной инфраструктуры морских портов; злоумышленник, имеющий возможность ознакомления с данными, которые обрабатываются объектами информационной системы морских портов, может модифицировать их с целью дезинформации или организации информационного воздействия на участников и сотрудников субъекта критической информационной инфраструктуры морских портов.

3. Перехват сеанса взаимодействия компонентов объекта информационной инфраструктуры морского порта заключается в реализации привязки нарушителя к исходному хосту, а штатному компоненту объекта выдаётся команда разорвать соединение; в результате легитимный компонент объекта информационной инфраструктуры морского порта оказывается незаметно подменённым; в результате успешной реализации атаки у злоумышленника появляется возможность распространения вирусов и других вредоносных программ (в том числе рассылке спама) между компонентами объекта информационной инфраструктуры морского порта;

4. Реализация парольных атак позволяет злоумышленнику получить пароль и логин легитимного компонента информационной инфраструктуры морского порта; нарушители могут реализовывать парольные атаки с использованием ряда методов, например: подмена IP-адреса, сниффинг (подслушивание), простой перебор паролей.

5. Атаки на прикладном уровне осуществляются рядом способов – главная уязвимость объекта информационной инфраструктуры морского порта при реализации атаки на уровне приложений заключается в

использовании одних и тех же портов, которым разрешён проход через межсетевой экран, а также в широком разнообразии установленных (в том числе внештатно) приложений и прикладных программных продуктов.

6. DOS-атаки реализуются с использованием множества компонентов объекта информационной инфраструктуры морского порта, одновременно направляющих запросы к серверу или подобным централизованным устройствам. DoS-атаки приводят к ряду негативных исходов, начиная со снижения качества обслуживания легитимных компонентов объекта информатизации и заканчивая полной потерей доступа таких компонентов; успешная реализация DoS атаки на один из объектов информационной инфраструктуры морского порта может негативно отразиться в том числе и на других объектах.

7. Атаки «IP-спуфинг» реализуются посредством подмены IP-адреса злоумышленника на IP-адрес легитимного пользователя объекта информационной инфраструктуры морского порта с использованием имеющийся карты маршрутизации или специальных программ в целях дальнейшего прерывания связи одного из штатных компонентов с объектом информационной инфраструктуры морского порта или получения возможности принятия защищаемой информации [4].

Реализация угроз информационной безопасности возможна в случае образования канала между источником угрозы и носителем данных. В отношении наличия легального доступа к объектам критической инфраструктуры информационной инфраструктуры морских портов все нарушители делятся на две группы: внешние и внутренние нарушители.

Внешние нарушители – это лица, не имеющие законного доступа к информационным ресурсам морских портов, реализующие угрозы посредством несанкционированного доступа из сетей общего пользования и сетей международного информационного обмена. К ним относятся криминальные структуры, злоумышленники или внешние субъекты, конкурирующие организации, недобросовестные разработчики и поставщики программных продуктов, бывшие сотрудники.

К внутренним злоумышленникам относятся физические лица, имеющие законный доступ к объектам критической информационной инфраструктуры морских портов, в том числе сами сотрудники того или иного структурного подразделения морского порта. К внутренним злоумышленникам на предприятии могут относиться администраторы объектов критической информационной инфраструктуры морских портов и администраторы безопасности, пользователи объектов критической информационной инфраструктуры морских портов, сотрудники, имеющие санкционированный доступ в служебных целях в помещения, в которых размещены ресурсы объектов критической информационной инфраструктуры морских портов, но не имеющие права доступа к ресурсам, обслуживающий персонал [5].

Внутренних нарушителей морского порта можно классифицировать по уровню возможностей, предоставляемых им системой контроля и управления доступом.

*Первый уровень.* Определяется самый низкий уровень возможностей ведения диалога с информационными системами или доступ к помещениям морского порта. Сотрудники имеют доступ к программно-аппаратным средствам, базам данных и помещениям морского порта в служебных целях.

*Второй уровень* – уровень прикладного программиста. Определяется возможностью создания и запуска собственных программ с новыми функциями по обработке информации морского порта. Сотрудник данного уровня может разработать программное обеспечение, которое будет внедрено в эксплуатацию морского порта.

*Третий уровень* – уровень администратора. Определяется возможностью управления функционированием объектов инфраструктуры, морского порта, т.е. воздействием на базовое программное обеспечение системы, на состав и конфигурацию ее оборудования.

*Четвертый уровень* – уровень системного программиста или разработчика. Определяется всем объемом возможностей лиц, осуществляющих проектирование, реализацию и ремонт технических средств, вплоть до включения в состав объектов инфраструктуры морского порта, закладок или собственных технических средств с новыми функциями по обработке информации.

Объекты критической информационной инфраструктуры морских портов склонны к воздействию широкого перечня угроз информационной безопасности. На основании сформированного перечня критических процессов информационной инфраструктуры морских портов произведен анализ уязвимостей и угроз информационной безопасности морских портов, а также проведена оценка факторов активности потенциального злоумышленника при организации

морских перевозок. Представленный анализ может быть использован для разработки модели угроз информационной безопасности при организации процессов морских перевозок, включающей описание существующих угроз ИБ, их значимости, вероятности реализации и последствий.

#### *Литература*

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р.
2. Приказ № 475 от 7.12.2017. Об утверждении Перечня объектов инфраструктуры морского порта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71760828/> (дата обращения: 14.12.2020).
3. Банк данных угроз безопасности информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bdu.fstec.ru/> (дата обращения: 14.12.2020).
4. Sokolov S.S., Glebov N.B., Antonova E.N., Nyrkov A.P. The Safety Assessment of Critical Infrastructure Control System // Proceedings of the 2018 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2018.
5. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/812> (дата обращения: 14.12.2020).

---

**Полещук Евгения Михайловна**  
Аспирантка МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
Эл. почта: [poleshuk@msun.ru](mailto:poleshuk@msun.ru)

**Путилова Софья Евгеньевна**  
Аспирантка МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
Эл. почта: [sofya.putilova@mail.ru](mailto:sofya.putilova@mail.ru)

**Щербинина Инна Александровна**  
Канд. пед. наук, доцент, декан физ.-тех. ф-та  
МГУ им. адм. Г.И. Невельского  
Эл. почта: [shcherbinina@msun.ru](mailto:shcherbinina@msun.ru)





*Секция 16*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В УПРАВЛЕНИИ И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

*Председатель секции – Сенченко Павел Васильевич, проректор по УР,  
доцент каф. АОИ, канд. техн. наук*



УДК 004.896

А.В. Ермаков, Л.И. Сучкова

## Разработка технологии и проектирование модели оперирования нечётких паттернов при принятии решений в коллективе автономных роботов

Описаны существующие подходы написания паттернов поведения автономных роботов экспертами, перечислены достоинства и недостатки. Низкая производительность интерпретации паттернов-правил приводит к поиску новых методов и архитектуры коллектива автономных роботов с целью ускорения выполнения паттернов, более оптимального их хранения. Предложенная модель описывает структуру паттернов, правила переходов из нечёткого представления и обратно, базовый алгоритм распределения задач в коллективе роботов и двухуровневую систему принятия решений, включающую локальное и глобальное планирование и непрерывное перепланирование.

**Ключевые слова:** автономный робот, мультиагентная система, нечёткая логика, принятие решений, экспертная система.

Общепринятого определения термина «искусственный интеллект» не существует. Обычно под этим термином подразумевается возможность машины обучаться на собственном опыте, приспосабливаться к новым входным данным и решать задачи, которые традиционно выполняются человеком [1].

Большинство существующих современных информационных систем не предназначены для принятия решения в полностью автономном режиме. В то же время рост производительности процессоров ведёт к увеличению спектра задач, поддающихся частичной или полной автоматизации.

На этапе проектирования разработчики должны предусмотреть и заложить все предполагаемые варианты поведения таких систем. Если система столкнётся с ситуацией, выходящей за рамки, то в лучшем случае может произойти программный сбой, в худшем – материальные или даже человеческие жертвы [2].

Одним из способов управления коллективом автономных роботов является написание паттернов – правил поведения. Эксперты на языке описания паттернов создают паттерны, руководствуясь которыми, роботы выполняют действия.

### Автономные интеллектуальные агенты

Примером автономного интеллектуального агента может служить космический аппарат, непрерывное управление которым с Земли может быть дорого, когда инженеры вручную принимают решение о следующем выполняемом действии, либо невозможно по различным причинам: периодическое отсутствие связи, большая кольцевая задержка (round-trip time, RTT) сигнала и т.д.

Под агентом понимается вычислительная система, помещенная в окружение, способная взаимодействовать с ним. Окружение формализуется с помощью множества состояний окружения  $S(s_0, s_1 \dots)$ , а возможные действия агента – с помощью множества  $A(a_0, a_1 \dots)$ . Взаимодействие агента и окружения описывается последовательностью выполняемых действий, которые меняют состояние окружения [3].

Поведение автономного агента может основываться как на собственном опыте, так и на встро-

енных знаниях, которые были вложены в него при разработке для работы в конкретном окружении. Начальная конфигурация агента может отражать некоторые предварительные знания об окружении, но по мере набора опыта агентом эти знания могут модифицироваться и дополняться.

Система автономна в той степени, в которой её поведение определено опытом.

При недостатке опыта агент будет вынужден выполнять случайные действия, чтобы получить обратную связь от окружения и анализировать, как выполняемые им действия влияют на окружение. Истинный автономный интеллектуальный агент должен быть способен работать в самых различных окружениях при условии достаточного времени на адаптацию [4].

### Окружение

В качестве входных данных агент получает информацию об окружении, выходными данными служат действия, влияющие на окружение.

В большинстве областей агент не будет обладать полной информацией об окружении. В лучшем случае агент будет иметь частичный контроль над окружением, влияя на него действиями. Одно и то же действие, выполняемое дважды при идентичных условиях, может привести к различным результатам, а то и вовсе не привести к желаемому результату.

Таким образом, окружение является недетерминированным, и агенты должны быть готовы к возможному отказу.

Для агента не существует отличий «реального» окружения от «виртуального», эмулируемого программно, поскольку все взаимодействия с окружением происходит через датчики и исполнительные механизмы. Говорить о простоте «виртуального» окружения некорректно, поскольку в некоторых случаях взаимодействие с «реальным» окружением может оказаться значительно проще.

Например, автоматизированный склад, где взаимодействие с окружением упрощено и решения принимаются с рядом допущений: все грузы промаркированы и лежат там, где их оставили; на пути следования тележек отсутствуют препятствия и пр.

Примером агента в «виртуальном» окружении является автопилот, запущенный в симуляторе самолёта.

Роботы в отличие от различных программных агентов функционируют в реальном физическом мире, в условиях реального времени с ограничениями в виде выдаваемых погрешностей в данных, получаемых с датчиков, и скорости реакции исполнительных механизмов.

Мобильные роботы в дополнение ко всему могут перемещаться в окружающем пространстве, меняя своё местоположение, и влиять на окружение с помощью манипуляторов. Получая информацию об окружении через сенсоры (например, лазерные дальнометры, стереокамеры), роботы формируют виртуальную картину мира, построенную из наблюдаемых данных после обработки.

Знания об окружающем мире, в том числе установленные разработчиком, или собранная статистика предыдущих запусков позволяют роботу более глубоко понимать реакцию окружения на выполняемые им действия и даже предсказывать с определённой достоверностью, что позволяет осуществлять планирование.

Планирование – вычисленная последовательность действий, полученная в результате поиска решения для достижения результата – может выполняться полностью в автономном режиме без участия человека или контролирующей системы, так называемого гипервизора, что в итоге позволяет создавать полностью автономных роботов.

Обычно агент обладает списком доступных действий, однако не все действия могут быть применимы к окружению, т.е. могут требовать дополнительные предусловия.

Например, действие «взять мяч» не может быть выполнено, если агент не располагает информацией о местоположении мяча в окружении. Как видно из примера выше, одной из основных проблем, стоящих перед агентом, является создание последовательности действий, выполнение которых приведёт к наиболее оптимальному решению поставленной перед агентом цели.

Сенсорные системы (машинное зрение, эхолокации и пр.) не способны предоставить абсолютно надёжную информацию о среде. Поэтому системы рассуждений и планирования должны быть приспособлены к работе в условиях неопределённости.

Наиболее сложными вариантами окружения являются частично наблюдаемые, стохастические, последовательные, динамические, непрерывные и мультиагентные – именно такое окружение будет рассматриваться в данной работе.

#### **Вывод на основе правил**

Существуют различные методы представления знаний и (или) алгоритмов, применяемых для создания и описания систем искусственного интеллекта.

Вывод на основе правил (rule-based inference) был и по сей день остаётся самым популярным методом, и практически все системы искусственного ин-

теллекта вплоть до 2000-х годов использовали логический вывод, основанный на правилах.

При этом метод и по сей день остаётся актуальным, и он был использован в работах [5, 6] (2017) и [7] (2018 г.).

Такие if-then-правила позволяют ИИ самостоятельно принимать решение, какое действие необходимо выполнить, чтобы изменить состояние окружения и получить требуемое.

Несмотря на кажущуюся примитивность задания набора правил, можно получить сложное наблюдаемое поведение агента, в том числе и в мультиагентной системе. В такой системе правила должны учитывать действия других агентов, а, значит, обмениваться информацией о выполняемых и планируемых к выполнению действиях.

С другой стороны, if-then-правила обладают существенными недостатками: написание правил требует больших усилий, достаточно часто на практике это означает предусмотреть все ситуации и комбинации входных параметров, а также разнообразные исключительные ситуации и их обработку. С увеличением сложности поведения и (или) сложности выполняемых задач в разы увеличивается объём правил, а количество допустимых состояний окружения приближается к бесконечности.

До недавнего времени при разработке специализированных информационных систем использовалась технология традиционного процедурного программирования. Это давало достаточно высокую скорость вычислений, однако такой подход ограничивает способность информационных систем к адаптации в изменяющихся условиях окружения, что является достаточно важным при решении интеллектуальных задач.

После почти 20-летнего развития в 1996 г. язык программирования «пролог» стал стандартом логических языков программирования.

Главной его особенностью от привычных процедурных или функциональных языков программирования является декларативный характер.

Однако несмотря на невероятные возможности декларативного программирования, «пролог» обладает фатальным недостатком в архитектуре и проявлял склонность к уходу в бесконечную рекурсию или значительному потреблению оперативной памяти при поиске решения для сложных проблем.

В настоящее время «пролог» практически умер в применении, оставшись применимым ещё на долгое время в академических кругах и для обучения программирования.

Тем не менее сама идея декларативного описания задачи успешно используется в таких языках, как SQL. В работе для описания адаптивного паттерна поведения мы предложили упрощённый предметно-ориентированный язык (DSL, domain-specific language).

#### **Нечёткие паттерны поведения**

Программа, основанная на if-then-правилах, специализирована для конкретного окружения.

Более общим и гибким подходом является создание интерпретатора общего назначения для правил, а затем определение наборов правил для конкретной проблемной среды – паттернов поведения.

Знания о результатах действий позволяют агентам успешно действовать в сложных вариантах окружения во время решения задач. Более просто устроенные рефлексные агенты способны найти решение в таких окружениях только благодаря удаче.

Знания и рассуждения начинают играть критическую роль, когда речь идет о частично наблюдаемых вариантах окружений. Агент, основанный на знаниях, способен сочетать общие знания с результатами восприятия наблюдаемого состояния окружения и имеет возможность выявить скрытые аспекты текущего состояния окружения.

Также такие агенты характеризуются значительной гибкостью, они способны достигать поставленных целей, получая опыт или инструкции извне, либо усваивая знания, полученные от окружения во время выполнения задачи.

Они способны приспосабливаться к изменениям в окружении, обновляя соответствующие знания под ситуацию. Принципы логики служат основным средством представления знаний агентов.

#### **Коллектив автономных роботов**

Одной из сложных задач группового управления является обеспечение совместной работы роботов с координацией выполняемых действий одновременно в пространстве и во времени. Многоагентные системы являются одним из методов реализации коллективного поведения роботов. Напомним, что под агентом понимается вычислительная система, помещенная во внешнюю среду, способная взаимодействовать с ней.

В общем случае задача группового управления роботами разбивается на ряд подзадач: формирование кластера из роботов  $P$  для достижения той или иной конкретной цели; оптимальное распределение функций между роботами в кластере; выполнение функций роботами, входящими в кластер.

Для описания агентов и моделирования действий используют интерпретируемые языки программирования. Код, написанный на таком языке, явля-

ется лингвистическим паттерном и состоит из описаний множества доступных состояний среды  $s$ , описаний доступных действий  $a$ , правил перехода из одного состояния в другое  $h$ , правил перехода состояний при межагентном взаимодействии.

Мультиагентная система обеспечивает взаимодействие с аппаратным обеспечением робота, абстрагируясь от деталей реализации и функционирования устройств.

#### *Литература*

1. Duan Y., Edwards J.S., Dwivedi Y.K. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data-evolution, challenges and research agenda // International Journal of Information Management. – 2019. – P. 63–71.
2. Бугайченко Д.Ю., Соловьев И.П. Абстрактная архитектура интеллектуального агента и методы её реализации // Системное программирование. – 2005. – Т. 1, № 1. – С. 36–67.
3. Wooldridge M. Intelligent agents: The key concepts // ECCAI Advanced Course on Artificial Intelligence. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. – P. 3–43.
4. Russell S., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. – 1995.
5. Araújo J., Pestana G. A framework for social well-being and skills management at the workplace // International Journal of Information Management. – 2017. – № 6. – P. 718–725.
6. Kao J.H. et al. Spatial analysis and data mining techniques for identifying risk factors of Out-of-Hospital Cardiac Arrest // International Journal of Information Management. – 2017. – № 1. – P. 1528–1538.
7. Rekik R. et al. Assessing web sites quality: A systematic literature review by text and association rules mining // International journal of information management. – 2018. – № 1. – P. 201–216.

#### **Ермаков Александр Васильевич**

Аспирант каф. ИВТиИБ Алтайского государственного технического университета (АлтГТУ)  
Эл. почта: tour0@ya.ru

#### **Сучкова Лариса Иннокентьевна**

Доктор техн. наук, проф.,  
проректор по учебной работе АлтГТУ  
Эл. почта: li.suchkova@yandex.ru

**А.А. Гавриленко**

## Ситуационный центр губернатора Томской области

Рассматриваются вопросы создания, внедрения эксплуатации информационно-аналитической системы управления «Ситуационный центр Губернатора Томской области». Автором проведен анализ мероприятий этапов внедрения данной системы.

**Ключевые слова:** ситуационный центр, управление, информационная система, принятие решений, визуализация.

В современных условиях информационно-аналитические системы становятся обязательным инструментом управления, поскольку на первый план выходит необходимость учитывать при принятии решений совокупности множества факторов, гибкой корректировки и оперативности в реализации управленческих решений. Идея комплексного управления, опирающаяся на широкое применение на практике информационно-аналитических систем, реализована в техническом решении под названием «ситуационный центр» (СЦ).

**Ситуационный центр** – современная форма реализации системы поддержки принятия решений, основанная на технологиях моделирования и анализа ситуаций, предельно концентрированном представлении информации и обеспечивающая интегральное управление [1].

С технической точки зрения ситуационный центр есть программно-аппаратный комплекс, оснащенный средствами интерактивного представления информации, предназначенный для осуществления мониторинга, оперативного управления и оперативного контроля.

Основанием для создания системы СЦ в Российской Федерации на всех уровнях управления является Указ Президента РФ № 648 «О формировании системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия». Куратором проекта выступает Федеральная служба охраны Российской Федерации (ФСО) [2].

На сегодняшний день введены и эксплуатируются ситуационные центры Президента РФ, Правительства РФ, Администрации Президента Российской Федерации, Госдумы РФ, Совета безопасности РФ, большинства федеральных органов власти [2]. На региональном уровне успешно функционирует ситуационный центр в Санкт-Петербурге [3], Московской области [4], Краснодарском крае [5], в 44 регионах работы по созданию и эксплуатации находятся в различных стадиях готовности.

В Томской области задолго до появления федеральной концепции создания системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия, предпринималась попытка создания локального регионального ситуационного центра губернатора Томской области (СЦ ГТО). Так, в декабре 2003 г. на основании распоряжения главы администрации (губернатора) Томской области от 08.12.2003 № 849-р «О создании рабочей группы по образованию единого ситуационного цен-

тра Томской области» перед группой специалистов под руководством председателя комитета информатизации департамента экономики и инвестиций администрации области [6] была поставлена задача разработать пакет правовых актов по созданию единого ситуационного центра Томской области. В 2010 г. состав рабочей группы был качественно обновлен: в состав группы включены заместители губернатора, представитель центра специальной связи и информации Федеральной службы охраны Российской Федерации в Томской области, а руководство группой с этого времени осуществлялось первым заместителем губернатора Томской области [7]. На данном этапе проводились мероприятия по комплексному обследованию информационных систем и массивов информации органов исполнительной власти Томской области, велась подготовка технического задания на разработку технического проекта по созданию нового интеграционного информационно-аналитического комплекса.

Федеральные инициативы 2013–2014 гг. по установлению единого регламента взаимодействия ситуационных центров оказали определяющее влияние на ход работ в Томской области, поскольку устанавливали дополнительные требования к архитектуре систем, правилам их использования, а также высочайшие требования к уровню информационной безопасности. Новые требования реализованы в распоряжении губернатора от 05.11.2015 № 319-р «О создании Ситуационного центра Губернатора Томской области» (вместе с «Положением о ситуационном центре губернатора Томской области») [8]. Куратором ситуационного центра губернатора Томской области в Томской области определили департамент развития информационного общества администрации Томской области, а в целях координации деятельности исполнительных органов государственной власти Томской области по формированию и использованию информационных ресурсов СЦ ГТО был создан коллегиальный орган – подкомиссия по развитию информационных ресурсов ситуационного центра и информационной безопасности координационной комиссии по развитию информационного общества при губернаторе Томской области [8].

Структура СЦ ГТО включает следующие компоненты, представленные рис. 1.

В период 2015–2019 гг. в рамках развития системы выполнены следующие технологические работы:

- интеграция информации из АИС государственного кадастра объектов недвижимости, геоинформа-

ционных систем уполномоченного исполнительного органа государственной власти Томской области;

- интеграция комплекса показателей социально-экономического развития из информационных систем Томской области;
- формирование открытых данных и создание их реестра;
- разработка модуля ведения паспортов муниципальных образований Томской области;
- разработка модуля мониторинга актуальности данных;
- разработка модуля прогнозирования развития лесных пожаров;
- разработка модуля сбора, анализа и визуализации информации о паводковой обстановке;
- проведение работ по информационному наполнению рабочих мест руководителей (презентационных панелей);
- разработка технологических решений и обеспечение интеграции со следующими информационными системами: ГАС «Управление», СМЭВ, ГИС «Агроуправление»;
- обеспечение ввода и отображение многомерных данных;
- обеспечение интеграции с единой системой идентификации и аутентификации;
- разработка функциональных возможностей для нанесения пользователем объектов и их атрибутов на электронную карту, а также просмотра изменений слоёв электронных карт в динамике по времени;

– разработка наборов слоёв электронной карты для группы слоёв, агрегирующих показатели природного потенциала, показателей сферы охраны окружающей среды;

– доработка функциональных возможностей для просмотра видеопотока с камер видеонаблюдения за лесными массивами.

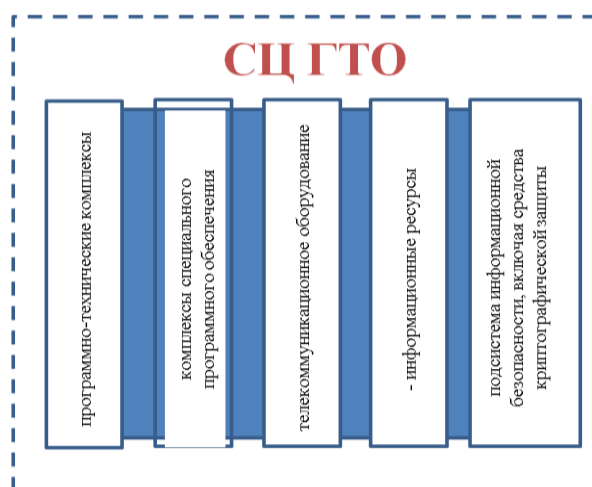


Рис. 1. Структура Ситуационного центра губернатора Томской области

Функционирование структурных компонентов СЦ ГТО, включая взаимодействие с внешними системами (ГИАЦ-Ц ФСО, НЦУО), определяется схемой организации связи, приведенной на рис. 2.

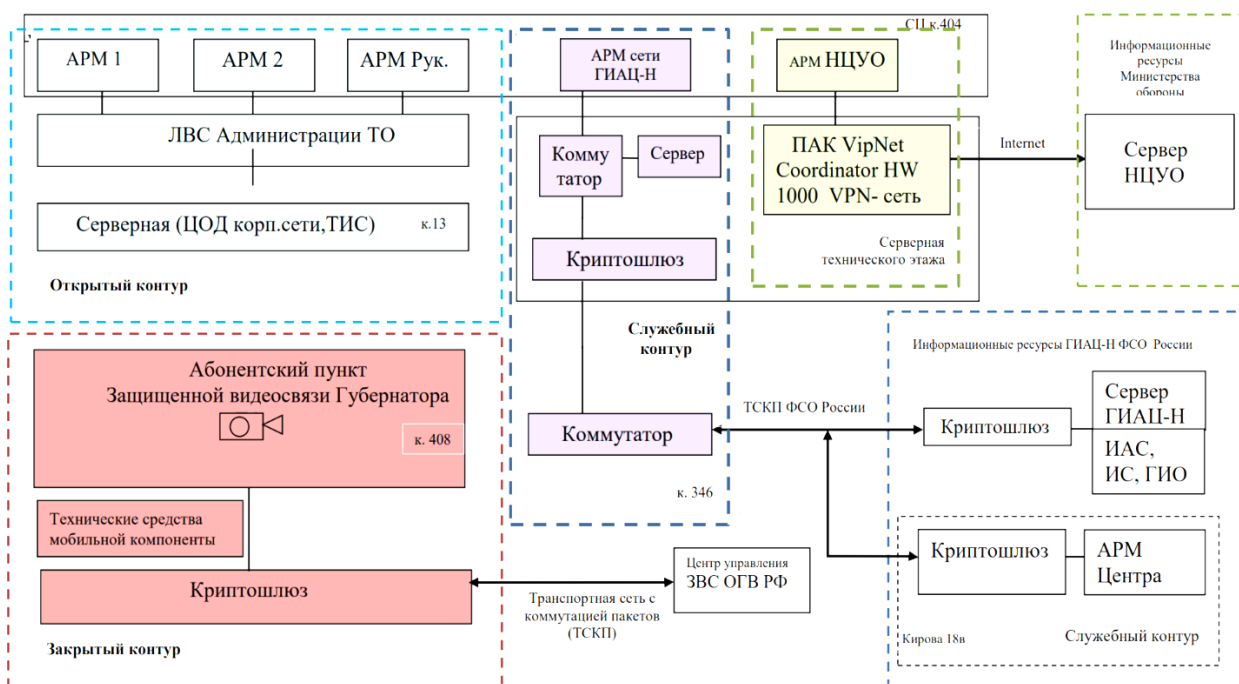


Рис. 2. Функциональная схема организации связи структурных компонентов Ситуационного центра губернатора Томской области

В конце 2019 г. в структуре администрации Томской области создан отдел по обеспечению деятельности СЦ ГТО, в котором организовано автоматизированное рабочее место (АРМ), подключенное к сети

межведомственного информационного взаимодействия НЦУО – для совершенствования межведомственного взаимодействия и способов обмена информацией по вопросам обороны. Также создано АРМ



служебного контура (специального сегмента СЦ ГТО), обеспечивающее доступ к информационным ресурсам сети ГИАЦ-Н с использованием оборудования центра – для обеспечения информационного обмена со следующими субъектами информационного взаимодействия:

- ситуационный центр Президента Российской Федерации;
- ситуационный центр полномочного представителя Президента Российской Федерации в Сибирском федеральном округе;
- ситуационный центр Правительства Российской Федерации;
- ситуационные центры федеральных органов исполнительной государственной власти;
- ситуационные центры исполнительных органов государственной власти субъектов Российской Федерации.

На текущий момент организовано подключение к 12 информационным системам основных информационных ресурсов ГИАЦ-Н.

В целях централизованного обобщения, анализа и обмена информацией, необходимой для обеспечения деятельности ИОГВ ТО и ОМСУ ТО, принятия управленческих решений и подготовки отчетности, на портале ИАС «Ситуационный центр Томской области» (доступ <http://monitoring.tomsk.gov.ru>) опубликовано свыше 80 аналитических отчетов по 12 функциональным направлениям: комплексная оценка и мониторинг социально-экономического положения, показателей уровня жизни населения, ана-

лиз динамики уровня официально регистрируемой безработицы, мониторинг цен на продовольственные товары, нефтепродукты и лекарственные средства, мониторинг закупок, мониторинг и анализ исполнения бюджета субъекта Российской Федерации и бюджетов муниципальных образований и др., а также разработано 3 аналитических отчета для планшетного компьютера (рис. 3).

Формирование комплекса показателей информационного обеспечения и наполнение баз данных осуществляются по следующим направлениям:

- экономическое развитие (основные экономические показатели, промышленность, сельское и лесное хозяйство, деятельность естественных монополий, экспорт, цены, доходы населения);
- предпринимательство (крупные предприятия, средние предприятия, малый бизнес, индивидуальное предпринимательство, торговля, демография предприятий);
- бюджеты (федеральный, региональный, внебюджетные фонды, государственные закупки);
- инфраструктура (ЖКХ, земельный фонд, строительство, энергетика, транспорт, связь, дороги, охрана окружающей среды);
- социальное развитие (качество жизни, здравоохранение, образование, жилье, культура, спорт, туризм, цены, демография и миграция);
- инвестиции;
- государственные программы;
- местное самоуправление.

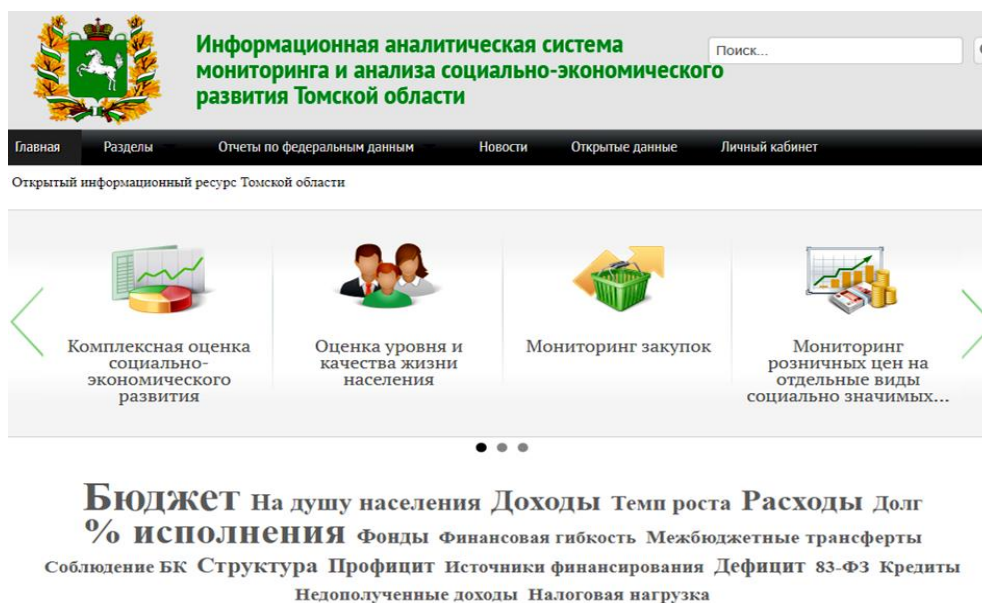


Рис. 3. Главная страница информационного портала Ситуационного центра губернатора Томской области

Вариант визуализации набора данных по направлению «Бюджеты» приведен на рис. 4.

Органам местного самоуправления муниципальных образований Томской области и организациям рекомендовано принять участие в формировании и использовании информационных ресурсов СЦ ГТО, для чего на период 2021–2023 гг. запланировано проведение серии обучающих семинаров для специали-

стов ОМСУ ТО, представителей крупнейших предприятий Томской области.

Таким образом, к 2021 г. актуальная информация, необходимая губернатору Томской области и всем руководителям ИОГВ Томской области для эффективного управления регионом, представляется в наглядном виде и доступна онлайн на цифровой панели СЦ ГТО.



**Информационная аналитическая система мониторинга и анализа социально-экономического развития Томской области**

Поиск...

Главная Разделы Отчеты по федеральным данным Новости Открытые данные Личный кабинет

Главная > Отчеты по федеральным данным > Расходы > Исполнение расходов субъектов и бюджетные расходы на душу населения

**Исполнение расходов (СФО)** Исполнение консолидированных бюджетов субъектов РФ по расходам (Расходы бюджета - ИТОГО) за 12 месяцев 2020 года

[Диаграмма распределения субъект](#)

Год: 2020 Месяц: Декабрь ФО: Сибирский федеральный округ Район: Расходы бюджета - ИТОГО

Субъект	ФО	Исполнено, млн.руб	Назначено, млн.руб	Исполнено %	Численность постоянного населения на 01.01.2020 г., тыс.чел.	Бюджетные расходы на душу населения, руб./чел.	Ранг бюдж. расходов на душу населения ФО	Ранг би. расходов на население
Российская Федерация		15 574 057,729	16 519 308,355	94,28%	146 748,590	106 127,478		
Сибирский федеральный округ	СФО	1 577 865,577	1 657 031,008	95,22%	17 118,387	92 173,730		
Алтайский край	СФО	148 325,541	159 349,159	93,08%	2 317,153	64 011,976	10	
Иркутская область	СФО	257 783,733	270 315,707	95,36%	2 391,193	107 805,490	4	
Кемеровская область	СФО	242 866,174	250 999,732	96,76%	2 657,854	91 376,793	5	
Красноярский край	СФО	332 713,856	344 066,773	96,70%	2 866,255	116 079,643	3	
Новосибирская область	СФО	236 515,413	250 345,592	94,48%	2 798,170	84 525,033	8	
Омская область	СФО	134 125,014	141 307,246	94,92%	1 926,665	69 615,120	9	
Республика Алтай	СФО	30 146,881	32 264,572	93,44%	220,181	136 918,632	2	
Республика Тыва	СФО	48 577,260	50 814,028	95,60%	327,383	148 380,519	1	
Республика Хакасия	СФО	48 339,098	53 436,086	90,46%	534,262	90 478,263	7	
Томская область	СФО	98 472,607	104 132,115	94,57%	1 079,271	91 239,927	6	

Рис. 4. Визуализация набора данных по направлению «Бюджеты»

При этом необходимо помнить: создание системы ситуационных центров является элементом более масштабной задачи создания системы стратегического планирования, основанной на принципах среднесрочного и долгосрочного программного управления, задачи мониторинга и прогнозирования возможных чрезвычайных ситуаций, создания системы объективной и независимой оценки деятельности органов государственной власти и местного самоуправления. В Томской области в период 2022 – 2024 гг. в соответствии с утвержденным планом мероприятий предполагается разработать техническое задание на создание модулей анализа и прогнозирования СЦ ГТО, обеспечивающих выполнение следующих функций:

- реализация на основе стандартизованных классификаторов единой системы целей и показателей, обеспечение единого механизма прохождения жизненного цикла документов, обеспечение единого механизма контроля достижения стратегических целей;
- генерация краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных вариантных прогнозов развития, а также многовариантного прогноза показателей Томской области;
- анализ реализации плана мероприятий по стратегии социально-экономического развития Томской области;
- анализ показателей функционирования развития приоритетных отраслей Томской области: промышленность, наука и образование, здравоохранение, сельское хозяйство, бюджетная сфера.

*Литература*

1. Указ Президента РФ № 648. О формировании системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Указ Президента РФ от 07.08.2004 № 1013. Вопросы Федеральной службы охраны Российской Федерации (в ред. 2021 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 24.04.2014 № 279. О государственной информационной системе Санкт-Петербурга «Интегрированная система информационно-аналитического обеспечения деятельности исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга» (в ред. 2021 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Постановление Правительства МО от 10.12.2019 № 942/43. О вводе в действие Центра управления регионом Московской области (вместе с «Положением о центре управления регионом Московской области») (в ред. 2021 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Постановление главы администрации (губернатора) Краснодарского края от 11.07.2019 № 409. Об утверждении Положения о ситуационном центре главы администрации (губернатора) Краснодарского края (в ред. 2020 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Распоряжение губернатора Томской области от 08.12.2003 № 849-р. О создании рабочей группы по образованию единого ситуационного центра Томской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

7. Распоряжение губернатора Томской области от 05.02.2010 № 29-р. Об организации работ по созданию Ситуационного центра губернатора Томской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

8. Распоряжение губернатора Томской области от 05.11.2015 № 319-р. О создании ситуационного центра губернатора Томской области (вместе с «Положением о Ситу-

ационном центре губернатора Томской области) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

---

**Гавриленко Анна Александровна**

Экономист департамента экономики Томской обл.

Эл. почта: AnnGavrilenko@mail.tsu.ru

УДК 004.42

Е.В. Грива

## Разработка информационной системы для сбора, анализа и представления данных о воронках продаж

Для бизнеса любого размера существует необходимость в отслеживании сделок, проходящих через воронку продаж. Воронка продаж – принцип, по которому можно разделить сделки на разные стадии. В разных компаниях воронки продаж могут принимать разный вид, но при любых обстоятельствах они имеют стадии открытия и закрытия сделки.

**Ключевые слова:** воронка продаж, прогнозирование, Swift, информационная система.

В настоящее время каждый бизнес, который продает свои товары через интернет, старается отслеживать то, на каком этапе совершения сделки клиенты теряют интерес к покупке. Сбор и анализ данных о состоянии сделок позволяет формировать стратегию продвижения товаров по разным каналам продаж.

Для помощи в сборе и анализе данных разрабатывается информационная система для операционных систем iOS и macOS.

Информационная система состоит из клиентской и серверной части. Клиентская часть разрабатывается на языке программирования Swift с использованием фреймворка SwiftUI [1]. Язык Swift идеально подходит для разработки приложений для платформ Apple, а новый молодой фреймворк SwiftUI позволяет очень быстро разрабатывать красивые и удобные интерфейсы [2, 3]. Для серверной части используются технологии Amazon AWS [4]. AWS предоставляет широкий спектр инструментов для создания информационных систем. Для взаимодействия с пользователями приложений используется технология AWS Amplify [5]. Для хранения и анализа данных используются технологии Amazon Kinesis [6], AWS Glue DataBrew [7] и Amazon S3.

Также приложение может взаимодействовать с API «Яндекс», «ВКонтакте» и Google AdWords для автоматической выгрузки данных из каналов продаж.

### Параметры, используемые в системе

Для начала пользователю необходимо заполнить данные показателей, полученных разными каналами продаж за неделю (или автоматически выгрузить данные из доступных сервисов). Необходимыми данными являются: клики, заявки, встречи, продажи, выручка и затраты.

После заполнения данных система автоматически рассчитает CV – conversion, параметр, который демонстрирует процент перехода клиентов с одного шага до другого. Всего в системе присутствуют три параметра CV: клики-заявки, заявки-встречи, встречи-продажи.

Расчет CV происходит по следующей формуле (1):

$$CV = \frac{A}{X} \times 100\%, \quad (1)$$

где A – значение первого шага воронки; X – значение второго шага воронки.

Далее происходит расчёт цены клика (CPC – cost per click), она рассчитывается из показателя клика и

затрат (2). По такому же принципу рассчитываются цена заявки (CPA – cost per action) (3) и цена клиента (CAC – customer acquisition cost) (4), но вместо кликов используется количество заявок (A – action) и количество встреч (C – clients) соответственно.

$$CPC = \frac{CPM}{C}, \quad (2)$$

$$CPA = \frac{CPM}{A}, \quad (3)$$

$$CAC = \frac{CPM}{C}, \quad (4)$$

где CPM – затраты на продвижение.

Далее происходит расчет среднего чека (AOV – average order value) (5):

$$AOV = \frac{\text{Выручка}}{\text{Продажи}}, \quad (5)$$

Важным параметром является ROI (от англ. return on investment) – окупаемость инвестиций, демонстрирующая уровень доходности или убыточности канала продаж (6):

$$ROI = \frac{\text{Выручка} - \text{Затраты}}{\text{Затраты}} \times 100\%. \quad (6)$$

Ну и последним рассчитываемым показателем является прибыль, которая является разницей между выручкой и затратами.

Также автоматически происходит расчет всех описанных выше показателей для всех каналов в сумме и расчёт сводных показателей за весь месяц.

В расчёт сводных показателей за месяц можно также вносить дополнительные затраты. После этого сводная таблица за месяц продемонстрирует показатель чистой прибыли за весь месяц.

### Прогнозирование воронок продаж

В блок фактических данных входят все ранее введенные и рассчитанные показатели, в том числе и за предыдущие месяцы. Если текущий месяц еще не закончен, то пользователь может воспользоваться прогнозом на конец месяца. Все незаполненные недели месяца будут автоматически заполнены данными.

Прогнозирование продаж – достаточно трудная задача. Такой прогноз опирается в основном на выявление скрытых закономерностей в накопленных данных.

Для информационной системы в качестве метода прогнозирования был выбран анализ временных

рядов, а конкретнее – метод экспоненциального сглаживания Хольта. Этот метод идеально подходит для прогнозирования с неполным набором данных (например, в случае если количество предыдущих периодов для анализа менее 12 месяцев). Также этот метод подходит, если у данных за предыдущие периоды есть тенденция к резкому изменению значений.

На текущий момент, так как данных у пользователя системы может не хватать, этот метод идеально подходит для прогнозирования.

Первым шагом является расчет экспоненциально сглаженного ряда, это популярный метод прогнозирования временных рядов (7):

$$L_t = k \times Y_t + (1-k) \times (L_{t-1} - T_{t-1}), \quad (7)$$

где  $L_t$  – сглаженная величина, относящаяся к текущему периоду;  $L_{t-1}$  – сглаженная величина, относящаяся к прошлому периоду;  $T_{t-1}$  – значение тренда, относящееся к предыдущему периоду;  $k$  – коэффициент сглаживания ряда;  $Y_t$  – текущее значение ряда (например, количество кликов).

Далее необходимо построить линию тренда и определить все значения тренда (8):

$$T_t = b \times (L_t - L_{t-1}) + (1-b) \times T_{t-1}, \quad (8)$$

где  $T_t$  – значение тренда, относящееся к текущему периоду;  $L_t$  – экспоненциально сглаженная величина, относящаяся к текущему периоду;  $T_{t-1}$  – значение тренда, относящееся к предыдущему периоду;  $b$  – коэффициент сглаживания тренда;  $L_{t-1}$  – экспоненциально сглаженная величина, относящаяся к предыдущему периоду.

Последним шагом является сам прогноз по методу Хольта, который необходимо провести для каждого прогнозируемого параметра (9):

$$\hat{Y}_{t+p} = L_t + p \times T_t, \quad (9)$$

где  $\hat{Y}_{t+p}$  – прогноз по методу Хольта, относящийся к  $p$  периоду;  $p$  – порядковый номер периода, для которого выполняется прогнозирование;  $T_t$  – значение тренда, относящееся к последнему периоду;  $L_t$  – экспоненциально сглаженная величина, относящаяся к последнему периоду.

Плюсом данного метода является то, что он достаточно легкий в исполнении и его постоянно можно корректировать. Но также присутствует и существенный минус. Так, например, если в каком-то из периодов будет значительное отклонение (например, предприятие проведет какое-либо мероприятие по стимулированию продаж), то это может в дальнейшем повлиять на прогнозные значения [8].

Не исключено, что в будущем для системы будет выбран другой метод прогнозирования.

#### Взаимодействие пользователя с информационной системой

Пользователь может зарегистрироваться в информационной системе как индивидуально, так и в составе группы людей. При регистрации группы людей они могут вносить изменения в данные в режиме онлайн, обновленные данные отобразятся у остальных. После регистрации пользователя встречается панель учета данных. Пользователь может создать у

себя локальную копию проекта, которая будет храниться в iCloud, и ею можно будет воспользоваться в любой момент как на iPhone, так и на компьютерах Mac, привязанных к аккаунту iCloud. Также пользователь может создать проект, который будет храниться в базе данных и который смогут редактировать другие пользователи, имеющие доступ.

После создания или открытия проекта перед пользователем появляется панель учета данных. В нее он может вносить показатели каналов продаж, а также добавлять новые каналы. В панели учета данных также можно увидеть динамику показателей за месяц и всю воронку продаж. На рис. 1 представлен пример интерфейса системы.



Рис. 1. Пример интерфейса системы

Пользователь также может перейти к панели статистики, где может увидеть все основные показатели за конкретный месяц или за все двенадцать месяцев, а также динамику этих показателей.

Важной панелью, доступной пользователю, является панель прогнозирования. В ней пользователь может устанавливать цели на период месяца, используя фактические данные, проводить анализ «что будет, если», а также создавать прогноз на конец месяца. Также в панели прогнозирования можно проводить декомпозицию цели на основе воронки или декомпозировать цель на основе сводных данных.

В последней панели пользователь может сформировать отчетность за выбранный период, которую можно представить в форматах Excel и PDF.

#### **Новизна предлагаемого решения**

В большинстве случаев воронки продаж строятся внутри конкретного канала продаж, что не позволяет руководителям организаций видеть общую картину, постоянно следить за всеми воронками сложно и неудобно. Разрабатываемое решение позволяет структурировать все воронки в одном месте, формировать итоговую отчетность и рассматривать, что будет, если увеличить или уменьшить какой-либо показатель на несколько процентов.

Немаловажной функцией для пользователей является прогнозирование следующих недель, которые могут помочь позволить подготовиться к тем или иным изменениям.

#### **Имеющиеся аналоги**

Основными аналогами являются встроенные в каналы продаж CRM-системы, которые позволяют отслеживать каналы продаж индивидуально. Примерами таких CRM-систем могут быть amoCRM, Bitrix24 и др.

Такие сервисы, как ClickFunnels и GetResponse, позволяют строить воронки продаж, но не имеют функций глубокого анализа воронок.

В будущем планируется расширить функционал прогнозирования в информационной системе. Так, например, планируется с согласия пользователей собрать данные их воронок продаж и использовать их для улучшения алгоритмов прогнозирования.

Также планируется создать WEB-версию клиентской части системы, которая позволит привлечь более широкую аудиторию.

#### *Литература*

1. SwiftUI Overview – Xcode – Apple Developer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.apple.com/xcode/swiftui/>, свободный (дата обращения: 16.09.2021).
2. Мартин Роберт. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения: пер. с англ. – СПб.: Питер, 2018. – 352 с.
3. Грива Е.В. и др. Разработка информационной системы управления рационализаторскими предложениями // «Инноватика–2021»: сб. матер. XVII Междунар. школы-конф. студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 22–23 апреля 2021 г. – Томск: STT, 2021. – С. 360–363.
4. Сенченко П.В. Организация баз данных: учеб. пособие. – Томск: ФДО, ТУСУР, 2015. – 170 с.
5. AWS Amplify [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aws.amazon.com/ru/amplify/>, свободный (дата обращения: 16.09.2021).
6. Amazon Kinesis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aws.amazon.com/ru/kinesis/>, свободный (дата обращения: 16.09.2021).
7. AWS Glue DataBrew [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aws.amazon.com/ru/glue/features/databrew/>, свободный (дата обращения: 16.09.2021).
8. Rahman M.H., Salma U., Hossain M.M., Khan M.T.F. Revenue forecasting using holt-winters exponential smoothing // Research & Reviews: Journal of Statistics. – 2016. – Vol. 5. – P. 19–25.

---

**Грива Егор Владимирович**  
Магистрант каф. АОИ ТУСУРа  
Эл. почта: [griva@arffis.com](mailto:griva@arffis.com)

С.А. Кузнецов, А.Д. Вильнин

## Сравнение методов оценки семантического сходства на основе doc2vec и tf-idf

При анализе социальных сетей актуальными являются задачи таргетированной рекламы, определения целевой аудитории, оценки сходства целевых аудиторий между собой и т.д. Текстовый контент, во-первых, несмотря на снижение его доли, является одним из основных видов контента, во-вторых, существуют устоявшиеся способы его анализа. Рассматривается решение задачи поиска целевых сообществ на основе семантического сходства. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка эффективности двух подходов оценки сходства наборов текстового контента сообществ на основе семантического сходства – методом машинного обучения – doc2vec и статистического – tf-idf.

**Ключевые слова:** социальная сеть, таргетированная реклама, текстовый контент, семантическое сходство, doc2vec, tf-idf.

Для решения задач таргетированной рекламы, определения целевой аудитории, оценки сходства целевых аудиторий между собой может быть использован текстовый контент сообществ социальной сети. Наиболее распространёнными способами анализа текстового контента являются методы doc2vec [1–3] и tf-idf [4–6]. Однако открытым остаётся вопрос о границах применимости каждого из методов, об условиях наиболее эффективного применения, ресурсоёмкости. Актуальной задачей является экспериментальная оценка эффективности каждого из методов относительно задач поиска целевой аудитории на основе сходства текстового контента.

### Описание метода doc2vec

При помощи метода doc2vec текстовый документ представляется в виде вектора.

Векторизация текста основана на обучении нейронной сети с одним скрытым слоем на специальной синтетической задаче. Метод векторизации текстовых документов doc2vec является развитием метода word2vec [1, 2], был впервые описан в 2014 г. [3]. Обучение моделей машинного обучения на векторных представлениях, полученных этим методом, даёт значительно лучшие результаты, чем обучение на векторах, полученных альтернативными методами, такими как bag of words, SVM и т.д.

В варианте Distributed Memory модель обучается предсказывать вероятность появления слова в документе на основе контекста, а в варианте Distributed Bag of Words – предсказывать вероятность появления случайных слов из документа по вектору слова.

Алгоритм doc2vec неявно сохраняет семантику.

### Описание метода tf-idf

Для семантического анализа текста также часто используется метод TF-IDF (от англ. TF – term frequency, IDF – inverse document frequency) – статистическая мера, используемая для оценки важности слова в контексте документа, являющегося частью коллекции документов или корпуса [4–6].

TF – это отношение количества употреблений какого-либо слова к общему количеству слов документа (1). Следовательно, анализируется значимость слова  $t_i$  в одном отдельном документе.

$$tf(t, d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}, \quad (1)$$

где  $n_t$  – количество слов  $t$  в текстовом документе, а в знаменателе – общее количество слов.

IDF – это обратная частотность документов, с которой какое-либо слово упоминается в документах коллекции (2). Для любого уникального слова в пределах точной коллекции документов присутствует одно значение IDF.

$$idf(t, D) = \log \frac{|D|}{|\{d_i \in D | t \in d_i\}|}, \quad (2)$$

где  $|D|$  – количество документов в коллекции;  $|\{d_i \in D | t \in d_i\}|$  – количество документов из коллекции  $D$ , в которой встречается  $t$  (когда  $n_t \neq 0$ ).

TF-IDF считается как произведение двух выражений (3):

$$tf-idf(t, d, D) = tf(t, d) * idf(t, D). \quad (3)$$

Большой вес в рамках одного документа в TF-IDF имеют слова с высокой частотой и с невысокой частотой использования в иных документах.

### Оценка сходства

Алгоритм оценки сходства состоит из следующих этапов:

- 1) извлечение постов сообществ социальной сети за один календарный год;
- 2) объединение постов за один календарный год в один для каждого сообщества;
- 3) предварительная обработка текста;
- 4) расчёт векторов TF-IDF для каждого текстового документа;
- 5) расчёт векторов doc2vec для каждого текстового документа;
- 6) расчёт косинусного расстояния между документами с использованием метода cosine similarity библиотеки Scikit-learn и построение матрицы сходства.

### Проведение эксперимента

В рамках деятельности Центра изучения терроризма, экстремизма, радикализации и киберугроз НИ ТПУ выполнялась работа по оценке сходства кон-

тента сообществ с признаками радикализации и сообществ без таковых – волонтеров, блогеров, фанатов.

Экспертным путём был сформирован список сообществ социальной сети, который содержит 391 сообщество с признаками радикализации, 70 сообществ без признаков радикализации, 18 сообществ блогеров, 63 сообщества волонтеров, 93 сообщества фанатов.

Проведён анализ семантического сходства контента. Для удобства приняты сокращения: РС – радикальное сообщество, СФ – сообщество фанатов, СБ – сообщество блогеров, СВ – сообщество волонтеров.

В табл. 1 и 2 для порога сходства 0.6 приведено наличие связи сообществ без признаков радикализации с сообществами с наличием таковых, что отмечено символом «+».

Таблица 1  
Сходство методом doc2vec с порогом более 0,6 для радикальных сообществ и сообществ блогеров, фанатов и волонтеров

Сообщество РС №	СФ № 1	СФ № 2	СФ № 3	СФ № 4
1	+	+	+	+
2			+	+
3				+
4				+
5				+
6				+

Таблица 2  
Сходство методом tf-idf с порогом более 0,6 для радикальных сообществ и сообществ блогеров, фанатов и волонтеров

Сообщество РС №	СБ № 1	СБ № 2	СБ № 3	СВ № 1	СФ № 1	СФ № 2	СФ № 3
1	+	+		+	+		
2	+						+
3	+						
4	+	+		+		+	
5	+						
6	+						
7	+	+		+			
8	+						
9	+						
10	+	+		+		+	
11	+						
12	+						
13	+			+			
14	+						
15	+						
16		+	+	+			
17		+		+			
18		+		+			
19				+			
20				+			
21				+			
22				+			
23				+			
24				+			
25				+			
26				+			
27				+			
28				+			

Продолжение табл. 2

Сообщество РС №	СБ № 1	СБ № 2	СБ № 3	СВ № 1	СФ № 1	СФ № 2	СФ № 3
29				+			
30				+			
31				+			
32				+			
33				+			
34				+			

На рис. 1 и 2 представлены полученные графы сходства.

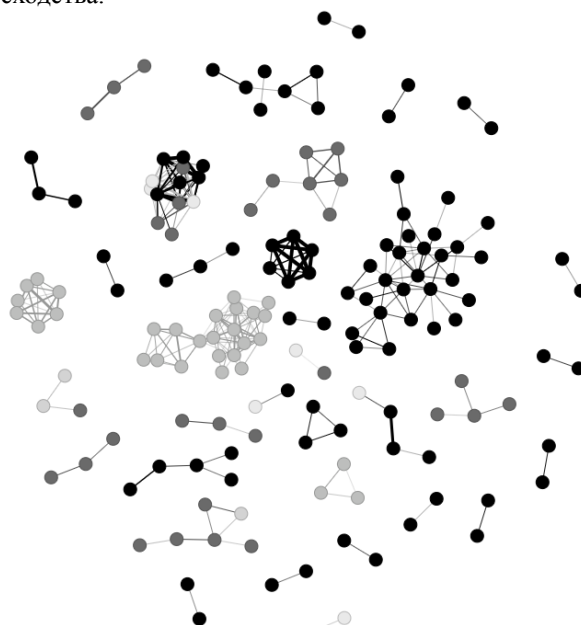


Рис. 1. Граф сходства, полученный методом doc2vec с порогом 0,6: наиболее светлый – без признаков радикализации; светло-серый – блогеры; серый – волонтеры; темно-серый – фанаты; чёрный – радикальные сообщества

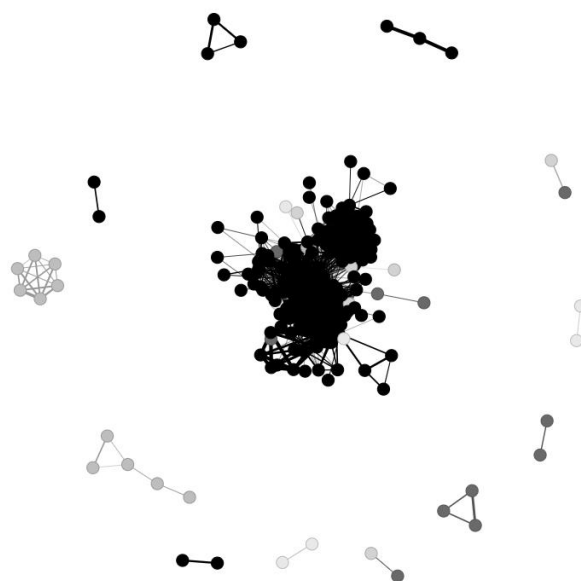


Рис. 2. Граф сходства, полученный методом tf-idf с порогом 0,6: наиболее светлый – без признаков радикализации; светло-серый – блогеры; серый – волонтеры; темно-серый – фанаты; чёрный – радикальные сообщества



На данных рисунках видно, что каждый метод по-разному формирует кластеры сообществ. Метод doc2vec сформировал 36 кластеров, метод tf-idf – 13. Также видно, что кластеры, сформированные методом doc2vec, более равномерны по размеру и метод более чувствителен к контексту сообществ. В том и другом случае кластеры сформировались в основном из сообществ одного цвета, что говорит о некотором подтверждении правильности работы методов.

#### **Заключение**

Проведённая экспериментальная проверка проиллюстрировала возможность использования двух методов для оценки семантического сходства. Однако были выявлены значимые отличия в условиях их применения.

Если стоит задача нахождения тематического сходства безотносительно того, в каком контексте обсуждаемый предмет излагается, то хорошо применим метод на основе tf-idf. Результаты данного метода хорошо интерпретируются, он интуитивно понятен. Однако если задача заключается в различении контекста используемых тем, то лучше применим метод на основе doc2vec. Он сложнее в освоении, более ресурсоёмок и его результаты тяжелее интерпретировать неподготовленному пользователю.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГЗ «Наука», в рамках проекта FSWW2020-0014.

#### *Литература*

1. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // ICLR (Workshop Poster). – 2013.
2. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G., Dean J. Distributed representations of words and phrases and their compositionality // Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2013. – Vol. 2 (NIPS'13). – P. 3111–3119.
3. Le Q., Mikolov T. Distributed Representations of Sentences and Documents // Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning. – 2014. – P. 1188–1196.
4. Miranda E., Aryuni M., Fernando Y., Kibitiah T. A Study of Radicalism Contents Detection in Twitter: Insights From Support Vector Machine Technique // 2020 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). – 2020. – P. 549–554.
5. Machová K., Mach M., Demková G. Modelling of the Fake Posting Recognition in On-Line Media Using Machine Learning // SOFSEM 2020: Theory and Practice of Computer Science. – 2020. – P. 667–675.
6. Scikit-learn Machine Learning in Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (дата обращения: 01.03.2021).

---

**Кузнецов Сергей Анатольевич**  
Инженер-исследователь ИШИТР НИ ТПУ  
Эл. почта: ksa11@tpu.ru

**Вильнин Александр Данилович**  
Канд. техн. наук, программист ИШИТР НИ ТПУ  
Эл. почта: VilninAD@tpu.ru

УДК 519.767.6

Д.А. Жуков

## Разработка программной библиотеки распознавания смысла текста

Представлены диаграммы планирования программной библиотеки распознавания смысла текста на языке UML, а также их обзор.

**Ключевые слова:** обработка естественного языка, смысл текста, семантика, семантический анализ.

На данный момент времени NLP (Natural Language Processing) является одной из самых быстро развивающихся и востребованных областей программирования. Большинство крупных международных корпораций активно используют системы, построенные с использованием технологий обработки естественного языка, в том числе голосовые ассистенты, анализ тональности текста, поисковые системы, а также машинный перевод.

Однако на данный момент не существует программных библиотек, способных предоставить пользователю с базовыми навыками программирования отыскать определённое смысловое содержание текста, несмотря на то, что данная задача является одной из фундаментальных задач не только NLP, но и сферы информационных технологий в целом [1–4].

### Объект, предмет, цель и задачи проекта

Объектом проекта является текст, предметом – смысл текста. Цель проекта состоит в том, чтобы разработать программу для распознавания информации в содержании текста и удобной эксплуатации в качестве программной библиотеки.

Задачи проекта: обзор предметной области, обзор программ аналогов, обзор программных библиотек, используемых для разработки подобных программ, разработка декомпозиции и структуры программы на блоки, описание программы средствами UML, возможное решение задачи средствами языка, среды программирования и программных инструментов.

### Бизнес-цель системы

Обеспечить удобное и эффективное интегрирование функции распознавания смысла текста в сторонние программы, где «удобное» подразумевает доступное в освоении пользователю, имеющему хотя бы базовые навыки программирования, и выполняющееся за минимально возможное количество действий пользователя, а «эффективное» – с использованием самых современных технологий в области NLP, создав программную библиотеку понимания смысла текста, предоставив тем самым удобную разработку систем, использующих функцию распознавания смысла текста.

### Декомпозиция цели на подцели

Основной целью проекта является 1 – обеспечение удобного и эффективного интегрирования функции распознавания смысла текста в сторонние программы. Данная цель состоит из подцелей 1.1 и 1.2: создание эффективной высокоточной программы

распознавания смысла в тексте и обеспечение удобного взаимодействия пользователя и программы соответственно. Цель 1.2, в свою очередь, можно разбить на подцели 1.2.1 – создание удобного программного интерфейса и 1.2.2 – включение функции гибкой настройки программы под нужды пользователя.

### Функциональные и нефункциональные требования к системе

В функциональные требования программы входят обеспечение возможности внедрения, редактирования и удаления ключевых слов, соответствующих искомой информации; распознавание заранее заготовленных ключевых слов в данном тексте и возвращение их внешней системе; возврат соответствующего сообщения в случае невозможности распознать ключевое слово.

К нефункциональным требованиям системы относится обеспечение удобного и эффективного внедрения, редактирование и удаление ключевых слов, соответствующих ключевой информации.

### Обзор программ аналогов

SpaCy – программная библиотека с открытым исходным кодом, написанная на языке Python. Предоставляет такие функции, как токенизация, dependency parsing, лемматизация, классификация текста и т.д. Отличие данного проекта состоит в том, что он, во-первых, включает множество функций, не нужных для выполнения задачи текущего проекта, во-вторых, разработчики подчёркивают, что он «много берёт на себя» в отношении настройки программы, отбирая у пользователя контроль над ситуацией [5].

Natural Language Toolkit – набор библиотек для обработки естественного языка, написанных на языке Python. Является одним из самых популярных инструментов, предоставляющих широкий функционал для работы с NLP. Используется в основном для исследовательских и обучающих целей, не нацелен на удобное практическое применение [6].

Rosette – API, используемый для NLP. Имеет широкий функционал, однако не позволяет пользователю напрямую вносить новые модели [7].

### Перечень сценариев

Сценарии:

- Добавление нового ключевого слова разработчиком стороннего ПО.
- Удаление ключевого слова разработчиком стороннего ПО.
- Редактирование ключевого слова разработчиком стороннего ПО.

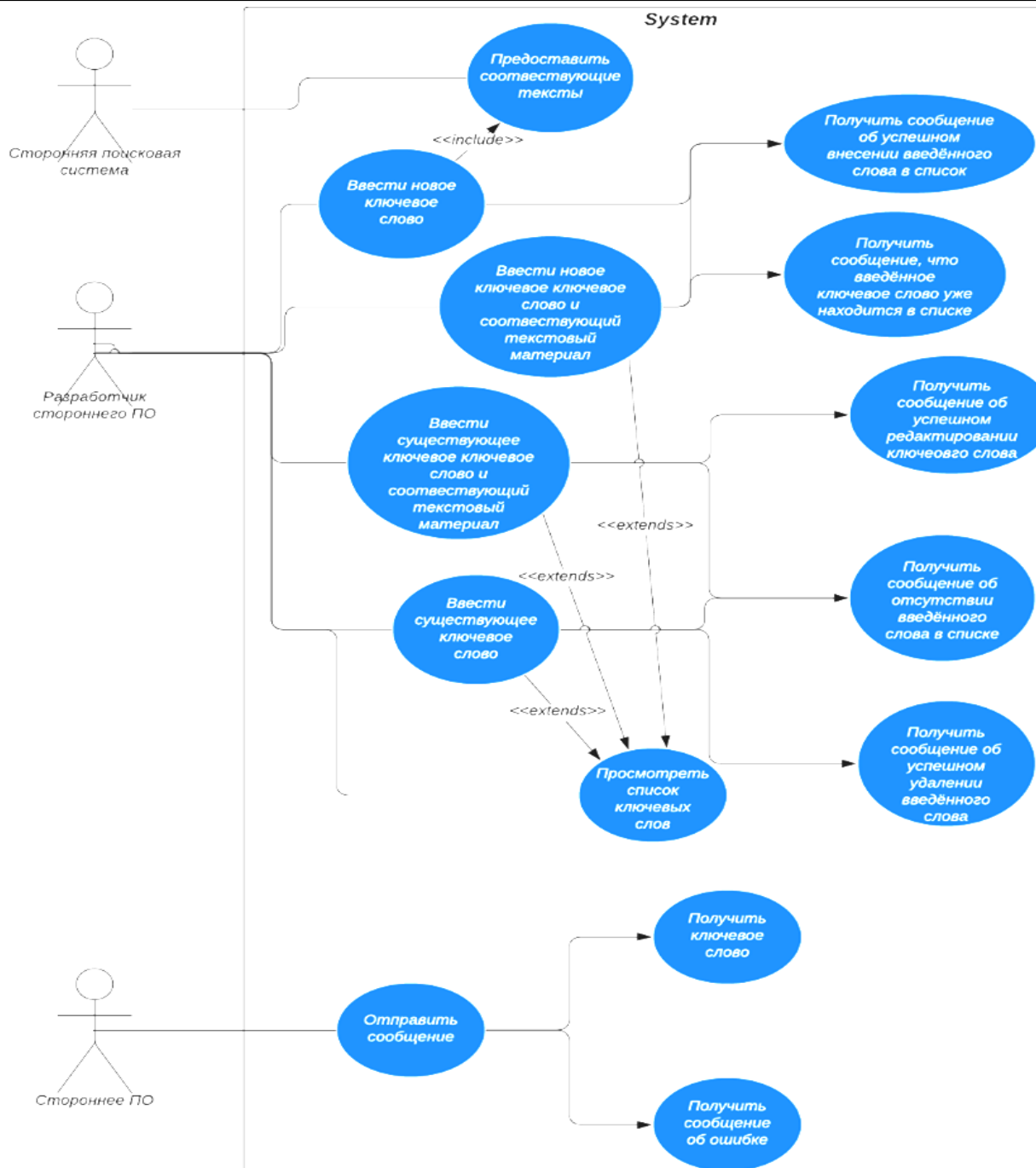


Рис. 1. Диаграмма сценариев

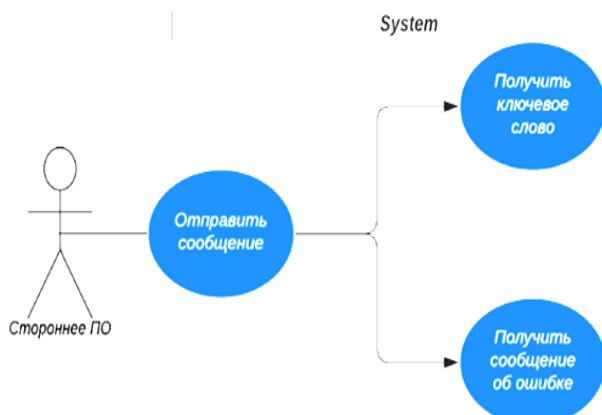


Рис. 2. Диаграмма избранного сценария

- Просмотр списка ключевых слов разработчиком стороннего ПО.
- Распознавание заранее заготовленных ключевых слов во входном тексте.

**Пример описания сценария**

В качестве избранного сценария взят сценарий «обработать сообщение».

Краткое описание сценария: данный вариант использования описывает отправку сообщения внешней системы на обработку.

В основной поток событий входят 1 – отправка сообщения внешней системой, 2 – обработка сообщения внутренней системой и возврат ключа внешней системе, 3 – отправление актором (внешней системой

обработки команд) сообщения внутренней системе, с последующим получением либо соответствующего, заранее известного системе, ключевого слова, либо сообщение об ошибке в случае невозможности внутренней системы определить ключевое слово. В альтернативный поток событий входит возврат сообщения об ошибке в случае невозможности обработать сообщение внешней системы. Предусловие – внешняя система должна быть заранее настроена на интерпретацию ключевых слов внутренней системы. Постусловие – имея возможность обработать входящее сообщение, система сделает это и вернёт соответствующее ключевое слово, в противном случае вернёт сообщение об ошибке.

#### **Программная реализация**

Программная реализация планируется в основном на языке Python (среда – Pycharm), возможно, также с использованием C++ (среда – MVS 2019). Также планируется использовать программные библиотеки Natural Language Toolkit и Keras.

#### *Литература*

1. Practical Natural Language Processing by / Sowmya Vajjala, Bodhisattwa Majumder, Anuj Gupta, Harshit Surana. – Publisher(s): O'Reilly Media, Inc., Released June 2020.

2. Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition – Edition: Second, Publisher: Prentice Hall, February 2008.

3. By Jacob Eisenstein. Introduction to Natural Language Processing (Adaptive Computation and Machine Learning series). – Publisher MIT Press Ltd, Publication date: 01 Oct 2019.

4. By Jason Brownlee. Deep Learning for Natural Language Processing: Develop Deep Learning Models for your Natural Language Problems, Publisher Machine Learning Mastery. – Publication date: 21 Nov. 2017.

5. Spacy.io [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spacy.io/>, свободный (дата обращения: 17.09.2021).

6. Nltk.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nltk.org/>, свободный (дата обращения: 17.09.2021).

7. Rosette [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rosette.com/>, свободный (дата обращения: 17.09.2021).

#### **Жуков Даниил Андреевич**

Студент каф. АСУ ТУСУРа  
Эл. почта: zhukovda01@gmail.com

Е.А. Касьян, М.М. Немирович-Данченко

## Использование метода анализа иерархий и критериального подхода для выбора модели прогнозирования индекса потребительских цен России

В рамках системного подхода исследуются математические модели прогнозирования индекса потребительских цен РФ на примере характерных значений для выбора оптимальной модели. Применение критериев оптимальности для трех ситуаций априорной информированности на основе полученных прогнозных значений с последующим применением метода анализа иерархий позволило выбрать приемлемую модель для прогнозирования индекса потребительских цен России к декабрю предыдущего года.

**Ключевые слова:** моделирование, прогнозирование, индекс потребительских цен России, критерии оптимальности, метод анализа иерархий Саати.

На принятие решений в области информационной безопасности экономических и финансовых структур значительное влияние оказывают представления о состоянии инфляции. Индекс потребительских цен (ИПЦ), наряду с другими индексами, является одним из инструментов измерения инфляции [1–3]. Существование широкого спектра методов прогнозирования ставит лицо, принимающее решения (ЛПР), перед необходимостью выбора одного или нескольких методов, наилучшим, в некотором смысле, образом решающим задачу прогноза [4].

В данной работе рассмотрен ИПЦ России к декабрю предыдущего года с 1999 по 2020 г., а также рассчитаны прогнозные значения на 2013, 2014 и 2016 гг. с целью исследования поведения четырех математических моделей. Из рассмотренных моделей прогнозирования рабочая модель выбрана с помощью критериев оптимальности с последующим применением метода анализа иерархий Томаса Саати (МАИ) [5].

### Предварительный анализ данных ИПЦ

В современной России наблюдение за потребительскими ценами осуществляется с 1991 г., числовые значения ИПЦ доступны на сайте Росстата [3], они выражаются в процентах.

Числовые данные взяты с 1999 по 2020 г. включительно по самой общей категории ИПЦ «Всего на товары и услуги», расчёты – к декабрю предыдущего года.

Для исследования были выбраны линейная и квадратичная модели кривой роста (ЛМКР и КМКР) и две адаптивные модели: модель простого скользящего среднего (МПСС) и модель Брауна (МБ).

Изначально был проанализирован исследуемый ряд ИПЦ России с 1999 по 2020 г., а именно было задано три диапазона изменения значений ИПЦ относительно предыдущего года: отрицательное ( $-\infty, -1$ ), нейтральное  $[-1, 1]$  и положительное  $(1, +\infty)$ . Затем значения ИПЦ были разделены согласно заданным диапазонам, в каждой группе найдено самое показательное значение и выбран соответствующий год для прогнозирования ИПЦ. При этом рассматривались года начиная с 2012 г. для соответствия требованию к полноте данных при прогнозировании. В качестве показательного года с уменьшением значения ИПЦ вы-

бран 2016 г. (разница с 2015 г. составила  $-7,52\%$ ), с увеличением значения ИПЦ – 2014 г. ( $+4,88\%$  относительно 2013 г.), без особого изменения – 2013 г. ( $-0,1$  относительно 2012 г.).

Для последующего расчета критериев оптимальности также были вычислены вероятности изменения ИПЦ в положительную, отрицательную или незначительную сторону на основе предыдущих лет как отношение частоты изменения ИПЦ из каждого диапазона к общему количеству рассматриваемых лет (22 г.).

### Параметры и особенности моделей.

#### Модели кривых роста

Для обеих моделей, линейной и квадратичной, уровень надежности был задан равным 95%.

Коэффициенты уравнений  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и коэффициенты детерминации для проверки адекватности моделей были получены при помощи встроенного средства Microsoft Excel «Регрессия». Полученные значения приведены в табл. 1

Таблица 1

Полученные значения всех коэффициентов детерминации и коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$

Модель	Год	R <sup>2</sup> *	Коэффициенты уравнения	
ЛМКР	2013	0,631	a	-1,476
			b	124,595
	2014	0,637	a	-1,375
			b	124,061
	2016	0,466	a	-0,976
			b	121,733
КМКР	2013	0,789	a	0,175
			b	-4,570
			c	132,847
	2014	0,789	a	0,145
			b	-4,177
			c	131,998
	2016	0,788	a	0,186
			b	-4,329
			c	132,351

\*Коэффициент детерминации.

Все модели кривых роста получились адекватны, кроме ЛМКР для 2016 г. (R<sup>2</sup> должен превышать 0,6). Стоит отметить, что, согласно полученным значениям коэффициентов детерминации, квадратич-

ная модель кривой роста для всех трех лет получилась более значимой ( $R^2 \approx 0,8$ ), чем линейная.

В результате проверки условий Гаусса–Маркова для ЛМКР и для КМКР выяснилось, что шум не смещен, случаен и имеет нормальное распределение. Для КМКР выполнилось и условие независимости шумов, т.е. автокорреляция отсутствует.

**Адаптивные модели**

Значения оптимальных параметров  $\alpha$  и  $\beta$  и полученных коэффициентов  $a$  и  $b$  модели Брауна приведены в табл. 2. Для МБ уровень надежности был задан равным 95%.

Таблица 2  
Значения оптимальных параметров и коэффициентов модели Брауна

Год	$\alpha$	$\beta$	$a_n$	$b_n$
2013	0,6	0,4	106,29	-0,92
2014	0,6	0,4	106,29	-0,52
2016	0,7	0,3	112,93	2,15

При построении модели простой скользящей средней количество наблюдений, входящих в интервал сглаживания, было задано  $m = 3$ .

В табл. 3 представлены полученные прогнозы по четырем моделям на 2013, 2014 и 2016 гг., а также фактические значения ИПЦ России.

Таблица 3  
Прогнозные значения ИПЦ на заданные года

Год	ИПЦ	ЛМКР	КМКР	МПСС	МБ
2013	106,5	102,5	110,7	107,3	105,4
2014	111,4	102,1	110,0	106,3	105,8
2016	105,4	104,2	114,8	110,8	115,1

Для проверки точности моделей обычно рассчитываются ошибки. Нами использованы выражаемые в процентах MAPE – средняя абсолютная ошибка, WAPE – взвешенная абсолютная ошибка, RMSE – среднеквадратичная ошибка, приведенные в табл. 4.

Таблица 4  
Значения ошибок

Год	Модель	MAPE, %	WAPE, %	RMSE, %
2013	ЛМКР	2,79	2,90	4,01
2014		2,79	2,72	4,05
2016		3,07	3,18	4,53
2013	КМКР	2,36	2,43	3,03
2014		2,35	2,43	3,03
2016		2,15	2,22	2,86
2013	МПСС	0,93	1,00	1,47
2014		0,87	0,94	1,43
2016		0,99	1,05	1,44
2013	МБ	3,06	3,13	3,99
2014		2,92	2,99	3,88
2016		2,92	2,98	4,04

По результатам трех рассмотренных ошибок самое высокое качество имеет МПСС, у которой значения ошибок прогноза не превышают 1,5%.

**Параметры принятия решений**

Нами рассмотрена однокритериальная задача принятия решений в условиях неопределенности.

Были заданы альтернативы, соответствующие четырем рассматриваемым моделям: А1 – ЛМКР, А2 – КМКР, А3 – МПСС, А4 – МБ. Состояния среды соответствуют ранее заданным диапазонам изменения значений ИПЦ: S1 – положительное изменение значения ИПЦ относительно предыдущего года, S2 – нейтральное, S3 – отрицательное.

Функция полезности, описывающая локальные критерии качества альтернатив при каждом состоянии среды, представлена в матричном виде в табл. 5. Локальные критерии рассчитывались как разность 100 и отклонение прогнозного значения от реального, умноженное на 10, по модулю.

Таблица 5  
Матричный вид функции полезности

Альтернатива (модель)	Состояния среды		
	S1	S2	S3
A1	59,90	7,04	87,73
A2	57,58	86,42	6,09
A3	91,63	49,97	46,27
A4	89,00	44,19	3,12
p*	0,286	0,238	0,476

\* Вероятность наступления состояния среды.

В работе рассмотрены все три ситуации априорной информированности (САИ) – вмешательство среды для ЛПР минимально, т.е. известно априорное распределение вероятностей наступления каждого из 3 состояний среды (1 САИ), вмешательство среды максимально (2 САИ), промежуточное состояние (3 САИ). Выбор решений осуществлялся с применением следующих критериев:

1. САИ – критерий Байеса–Лапласа (БЛ), критерий минимума среднего квадратического отклонения функции полезности (СКО), модальный критерий (МК), критерий минимума энтропии математического ожидания функции полезности (ЭМО).
2. САИ – максиминный критерий Вальда (КВ) и критерий минимаксного риска Сэвиджа (КС).
3. САИ – критерий Гурвица (КГ) и критерий Ходжеса–Лемана (КХЛ).

В сводной табл. 6 отмечены только те модели, которые получились лучшими согласно каждому критерию. Из табл. 6 видно, что для первой САИ оптимальным решением будет ЛМКР, а для второй и третьей САИ – МПСС.

Таблица 6  
Результаты применения всех критериев для трех САИ

Мо-дель	Ситуация априорной информированности							
	Первая САИ		Вторая САИ		Третья САИ			
	Критерий							
	МК	БЛ	СКО	ЭМО	КВ	КС	КГ	КХЛ
ЛМКР	+	+		+				
КМКР								
МПСС			+		+	+	+	+
МБ								

**Метод анализа иерархий (МАИ) Саати и выбор оптимальной модели прогнозирования ИПЦ России**

При выборе приемлемых для данной задачи методов прогноза был применен метод анализа иерар-

хий (МАИ) Саати, для этого проблема была структурирована в виде иерархии, включающей в себя цель, критерии, альтернативы.

Цель – выбрать оптимальную модель для прогнозирования ИПЦ России.

Критерии:

1. Результаты применения критериев оптимальности для первой САИ (1САИ).
2. Результаты применения критериев оптимальности для второй САИ (2САИ).
3. Результаты применения критериев оптимальности для третьей САИ (3САИ).
4. Простота расчетов (ПР).
5. Близость результатов к фактическим значениям ИПЦ России на примере 2013, 2014 и 2016 гг. (БЗ).

Альтернативы:

1. ЛМКР;
2. КМКР;
3. МПСС;
4. МБ.

Следующий шаг – вычисление вектора приоритетов для критериев по обратносимметричной матрице парных сравнений (табл. 7), наиболее значимым критерием оказался БЗ, а наименее – ПР.

Таблица 7

№	Критерий	Локальный вектор приоритетов
1	1САИ	0,155
2	2САИ	0,108
3	3САИ	0,291
4	ПР	0,029
5	БЗ	0,417

Затем аналогичная процедура выполняется для матриц парных сравнений для отдельных критериев по всем альтернативам. По каждой полученной матрице вычислено отношение согласованности матриц (табл. 8). Оценки для всех матриц согласованы в том смысле, который предложен Т. Саати [5], т.е. все оценки имеют отношение согласованности не более 10%.

Таблица 8

**Отношение согласованности для всех матриц парных сравнений**

№	Матрица парных сравнений	Отношение согласованности, %
1	Для критериев	4
2	Для альтернатив по 1САИ	6
3	Для альтернатив по 2САИ	5
4	Для альтернатив по 3САИ	3
5	Для альтернатив по ПР	6
6	Для альтернатив по БЗ	2

Заключительный этап – синтез локальных приоритетов. В табл. 9 представлены упорядоченные глобальные приоритеты альтернатив, на основе которых выбрано наилучшее решение (оптимальная альтернатива), ею оказалась МПСС.

**Заключение**

В работе рассматривались четыре математические модели, две регрессионные и две адаптивные:

линейная модель кривой роста, квадратичная модель кривой роста, модель Брауна, модель простого скользящего среднего с целью их сравнительного анализа и выбора оптимальной модели для прогнозирования ИПЦ России к декабрю предыдущего года.

Таблица 9

**Упорядоченный синтез локальных приоритетов**

№	Альтернативы	Глобальные приоритеты
1	МПСС	0,532
2	ЛМКР	0,269
3	КМКР	0,119
4	МБ	0,081

Прогнозные значения по данным моделям были получены на предыдущие года (2013, 2014 и 2016 гг.) для исследования результатов по каждой из моделей, а именно, насколько хорошо модель дает прогноз при увеличении, уменьшении или относительной неизменности значения ИПЦ. Выбор этих лет обусловлен заданной градацией отклонения значений ИПЦ относительно предыдущего года и выбором показательного года из каждого диапазона (положительное, отрицательное или нейтральное изменение значения ИПЦ).

Были рассмотрены три ситуации априорной информированности. Для принятия решения применялись следующие критерии: критерий Байеса–Лапласа, критерий минимума среднего квадратического отклонения функции полезности, модальный критерий, критерий минимума энтропии математического ожидания функции полезности, максиминный критерий Вальда, критерий минимаксного риска Сэвиджа, критерий Гурвица, критерий Ходжеса–Лемана. В качестве состояний среды использовались три диапазона изменения значений ИПЦ, заданные ранее. Локальные критерии качества рассчитывались из отклонения полученных прогнозов от реальных значений ИПЦ. Вероятности наступления состояния среды были получены на основании предыдущих лет с 1999 по 2020 г. Согласно результатам рассмотренных критериев, для первой САИ оптимальным решением будет ЛМКР, для второй и третьей САИ – МПСС.

Для выбора оптимальной модели прогнозирования ИПЦ применялся метод анализа иерархий Саати. Критериями выступили результаты применения критериев оптимальности для каждой ситуации априорной информированности, простота построения модели и близость полученных прогнозов к реальным значениям ИПЦ за прошедшие 2013, 2014 и 2016 гг. Исходя из результатов применения МАИ, самой оптимальной моделью для прогнозирования индекса потребительских цен России к декабрю предыдущего года, выраженного в процентах, является модель простого скользящего среднего, и применять рекомендуется именно ее.

Результаты данной работы могут быть применены для анализа рассмотренных моделей на примере прогнозирования ИПЦ, для самостоятельного выбора оптимальной модели прогнозирования ИПЦ

России (так как результаты МАИ Саати несут субъективный характер), а также для аналогичного исследования других моделей прогнозирования или иных экономических показателей.

*Литература*

1. Чупина С.В. Прогнозирование национальной экономики: учеб. пособие. – Томск: Томский гос. пед. ун-т, 2010. – 143 с.
2. International Labour Office (ILO) and others, Consumer Price Index Manual: Theory and Practice. – Geneva, ILO, 2004. – [https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/WCMS\\_331153/lang-en/index.htm](https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/WCMS_331153/lang-en/index.htm)
3. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>, свободный (дата обращения: 01.03.2021).

4. Хайруллина О.И. Эконометрика: базовый курс / О.И. Хайруллина, О.В. Баянова. – Пермь, 2019. – 176 с.

5. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. – 1990. – Vol. 48. – P. 9–26.

---

**Касьян Елизавета Александровна**

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: meelisia@yandex.ru

**Немирович-Данченко Михаил Михайлович**

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: michnd@mail.ru





*Секция 17*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБУЧЕНИИ**

*Председатель секции – Дмитриев Вячеслав Михайлович,  
профессор каф. КСУП, д-р техн. наук*



УДК 372.853

**А.В. Баранов**

## Экспериментирование и моделирование в виртуальных лабораториях физики

Обсуждается проблема освоения студентами технического университета фундаментальных видов деятельности экспериментирования и моделирования при работе с виртуальными лабораториями физики в мультимедийной образовательной среде. Сформулированы требования к структуре виртуальных лабораторий и методическому обеспечению. Констатируется необходимость сочетания виртуальных экспериментов и тематических видеодемонстраций реальных экспериментов лабораторного практикума в дистанционном формате образовательного процесса.

**Ключевые слова:** обучение физике, дистанционное образование, виртуальные лаборатории, деятельность экспериментирования, деятельность моделирования.

Как известно, физика является базовой учебной дисциплиной в технических университетах [1, 2]. По мнению Карла Вимана (Нобелевская премия 2001 г.), используя инструментарий физики в обучении, преподаватели могут побудить студентов к переходу от бездумного запоминания формул к пониманию явлений и процессов [3]. Безусловно, способы и средства, используемые в образовательном процессе, играют при этом ключевую роль.

Согласно современной дидактике, в процессе обучения физике студенты осваивают два вида фундаментальной учебной деятельности – экспериментирование и моделирование [4, 5]. В этом отношении лабораторный практикум курса физики технического университета давно зарекомендовал себя как уникальное средство освоения этих видов деятельности. Учебные лабораторные эксперименты знакомят обучающихся с реальными физическими системами, процессами и явлениями. Студенты имеют дело с измерительными приборами, методами измерений физических величин и способами обработки экспериментальных результатов.

Планирование и выполнение экспериментов, проведение измерений и обработка результатов, оформление отчетов являются очевидными составляющими деятельности экспериментирования в физическом лабораторном практикуме. А предварительное знакомство студентов с теоретическими модельными представлениями об изучаемых явлениях делает возможными процессы верификации моделей, анализа и обсуждения этих представлений при выполнении учебных лабораторных экспериментов; позволяет устанавливать и анализировать разницу предсказаний идеализированных моделей физики и поведения физической реальности.

И, очевидно, лабораторный практикум базовой учебной дисциплины в дальнейшем служит фундаментом для прохождения студентами технического университета профессионально ориентированных практикумов.

Необходимость внедрения дистанционных образовательных технологий обозначила актуальность проблемы реализации лабораторного практикума курса физики в технических университетах. Проблема значительно обострилась в связи с глобальной

социальной проблемой – пандемией COVID-19. Решение проблемы лабораторного практикума стало осуществляться с началом процесса программных разработок, внедрением и использованием виртуальных лабораторий [6–10].

По определению А.В. Трухина, «виртуальная лаборатория представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить опыты без непосредственного контакта с реальной установкой или при полном отсутствии таковой» [11].

В настоящее время под виртуальными лабораториями понимают второй вариант реализации – компьютерные виртуальные лаборатории. Последние представляют собой интерактивные компьютерные симуляции физических систем и процессов, использующие возможности 3D-визуализации и позволяющие создавать как реалистичные изображения моделируемых систем, так и динамически иллюстрировать происходящие с ними изменения.

Современные графические средства визуализации позволяют демонстрировать в виртуальных лабораториях сложные для наблюдения или вообще «ненаблюдаемые» в реальности системы и процессы, например, пространственные распределения физических полей, движение элементарных частиц и т.п.

Применение многооконных графических интерфейсов дает возможность максимально информативно иллюстрировать динамику процессов, позволяя при проведении виртуальных экспериментов не только визуализировать происходящие изменения посредством 3D-изображений моделируемых систем в основном окне, но и сопровождать в дополнительных окнах интерфейса отображением изменений динамическими построениями графиков зависимостей для физических величин, характерных для моделируемых процессов.

Очевидно, применение виртуальных лабораторий как дополнительного дидактического средства открывает новые возможности для более полного восприятия студентами основополагающих концепций физики, представляемых в учебных курсах технических университетов. Например, опыт показывает, что студенты, поработавшие в процессе подготовки к реальной лабораторной работе с виртуальным аналогом, быстрее и эффективнее выполняют

физический эксперимент практикума, демонстрируют при обсуждении более глубокое понимание исследуемых процессов и явлений.

Но при использовании в учебном процессе виртуальных лабораторий следует понимать и помнить, что компьютерные симуляции физических систем и процессов основываются на математических моделях той или иной степени сложности, зависящей от уровня абстрагирования при формировании концептуальных представлений о физике моделируемых объектов.

В частности, и по этой причине появление и внедрение виртуальных лабораторий в образовательный процесс технических университетов вызывает в педагогическом дискурсе закономерные вопросы о дидактическом соответствии нового актуального средства обучения средствам и возможностям классического лабораторного практикума, имеющего дело с реальными системами и процессами, а не с их виртуальными симуляциями [12–17].

В контексте обсуждаемой темы возникает вопрос о возможности организации виртуального лабораторного практикума, обеспечивающей определенный уровень освоения студентами фундаментальных видов деятельности экспериментирования и моделирования. Особо актуальным этот вопрос становится при переходе технических университетов на дистанционный образовательный формат в периоды пандемий [14, 17].

Ответ на этот вопрос предполагает анализ упомянутых выше двух видов деятельности, процесса их освоения студентами в физическом лабораторном практикуме и возможности реализации такого процесса в виртуальном практикуме.

Подготовка студентов к учебному физическому лабораторному эксперименту связана с работой по методическому пособию, включающему описание: теоретических модельных представлений, содержания и процесса выполнения эксперимента, структуры и схемы физической установки, особенностей используемых измерительных приборов и методов измерений, задания для выполнения. Для каждого учебного эксперимента ставится определенная цель, а в задании для выполнения формулируется система задач. Выполнение эксперимента происходит в соответствии с поставленной целью путем последовательного решения этих задач (сборка и изменения экспериментальной установки, проведение измерений, обработка и анализ результатов, составление отчета).

Очевидно, для виртуального лабораторного практикума должны быть подготовлены как сами виртуальные лаборатории, так и специализированные методические пособия. В этих пособиях описание, подобные перечисленным выше, должны быть представлены с учетом и явным указанием на работу в виртуальном эксперименте с математическими моделями, используемыми для визуального представления моделируемых систем и процессов на экране компьютерного монитора.

Процесс выполнения виртуального эксперимента должен являться имитацией деятельности экспериментирования при выполнении реального физического эксперимента. Как было сказано выше, деятельность должна включать такие пункты, как сборка и изменения виртуальной установки, проведение измерений с использованием виртуальных приборов, обработка и анализ полученных результатов, составление отчета.

В главном окне графического интерфейса виртуальной лаборатории следует максимально правдоподобно визуализировать моделируемый аналог реальной физической установки. Необходимо предусмотреть возможность внесения изменений в конструкцию установки и её сборку (например, в соответствии с электрическими схемами), осуществлять выбор значений характерных физических параметров установки, имитировать процессы измерений с помощью виртуальных приборов. Визуализация последних также должна быть максимально приближена к виду реальных приборов, используемых на практике в лабораториях, с симуляцией работы элементов управления и настройки.

При составлении студентами отчета по проведенному физическому лабораторному эксперименту в пункте «Вывод» отражается сравнение теоретических модельных представлений и результатов, полученных в эксперименте. Такое сравнение является одним из основополагающих моментов в освоении студентами деятельности моделирования. Правильно сделанный вывод по результатам физического эксперимента должен инициировать размышления студентов о необходимости внесения определенных изменений в концептуальные физические и математические модели изучаемых систем, процессов и явлений.

Но при работе студентов с виртуальными лабораториями фактически происходит экспериментирование с математическими моделями, используемыми для симуляции реальности. Чтобы суть и структура вывода в отчете остались прежними (сравнение предсказаний модели с поведением физической реальности), необходимо сравнение результатов виртуального эксперимента с результатами реального.

В дистанционном формате такой подход может быть реализован с помощью видеодемонстраций физических лабораторных экспериментов, для которых проделанные виртуальные являются аналогами. В таком случае в виртуальных лабораториях следует предусмотреть возможность модификации математических моделей в направлении более адекватного представления реальности. Последнее предполагает определенную иерархию используемых моделей и методов решения уравнений, включая численные методы.

Очевидно, при подобной организации работы обучающихся с использованием виртуального лабораторного практикума достаточно убедительной представляется возможность освоения студентами технического университета фундаментальных видов деятельности экспериментирования и моделирования в курсе физики.

## Литература

1. Гладун А.Д. Нужна ли в России физика инженеру? / А.Д. Гладун, Г.Г. Спиринов // Физическое образование в вузах. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 5–10.
2. Zalewski J. An Overview of Teaching Physics for Undergraduates in Engineering Environments / J. Zalewski, J. Novak, R.E. Carlson // Educ. Sci. – 2019. – Vol. 9 (4). – 278 p. – <https://doi.org/10.3390/educsci9040278>
3. Wieman C. Transforming physics education / C. Wieman, K. Perkins // Physics Today. – 2005. – Vol. 58, № 11. – P. 36–41.
4. Разумовский В.Г. Деятельность моделирования как фундаментальная учебная деятельность / В.Г. Разумовский, Ю.А. Сауров, В.Я. Синенко // Сибирский учитель. – 2013. – № 2(87). – С. 5–16.
5. Сауров Ю.А. Экспериментирование и моделирование как коллективная познавательная деятельность в обучении физике / Ю.А. Сауров, К.А. Коханов // Вестник Вятского гос. гум. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 130–135.
6. Кравченко Н.С. Комплекс компьютерных моделирующих лабораторных работ по физике: принципы разработки и опыт применения в учебном процессе / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская, В.А. Стародубцев // Физическое образование в вузах. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 85–95.
7. Баранов А.В. Проектная разработка виртуальных лабораторных работ по физике для электронной среды обучения // Единая образовательная среда: направления и перспективы развития электронного и дистанционного обучения: матер. IX Междунар. науч.-практ. конф.-выставки. – Новосибирск, 2010. – С. 71–73.
8. De Jong T. Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education / T. De Jong, M.C. Linn, C.Z. Zacharia // Science. – 2013. – Vol. 340. – P. 305–308. doi: 10.1126/science.1230579
9. Девяткин Е.М. Комплекс электронных лабораторных установок по общей физике / Е.М. Девяткин, С.Л. Хасанова, Н.В. Чиганова // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=24> (дата обращения: 22.09.2021).
10. Baranov A.V. Virtual Students' Laboratories in the Physics Practicum of the Technical University // Proceedings of the 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2016. – Novosibirsk: NSTU NETI. – 2016. – Vol. 1. – P. 326–328. doi: 10.1109/APEIE.2016.7802287.
11. Трухин А.В. Об использовании виртуальных лабораторий в образовании // Открытое и дистанционное образование. – 2002. – № 4 (8). – С. 67–69.
12. Девяткин Е.М. Интерактивные средства электронного и дистанционного обучения дисциплин естественно-научного цикла / Е.М. Девяткин, С.Л. Хасанова // Современные проблемы науки и образования. – 2018. – № 6. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28256> (дата обращения: 22.09.2021).
13. Hamed G. The effectiveness of using virtual experiments on students' learning in the general physics lab / G. Hamed, A. Aljanazrah // Journal of Information Technology Education: Research. – 2020. – Vol. 19. – P. 977–996. – URL: <https://doi.org/10.28945/4668>
14. Klein P. et al. Studying physics during the COVID-19 pandemic: Student assessments of learning achievement, perceived effectiveness of online recitations, and online laboratories // Phys. Rev. Phys. Educ. Res. – 2021. – Vol. 17. – P. 010117. doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010117
15. Баяндин Д.В. Дидактические аспекты применения интерактивных компьютерных технологий в лабораторном практикуме // Образовательные технологии и общество. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 511–533.
16. Аношина О. В. Виртуальный лабораторный практикум: преимущества и недостатки // Новые информационные технологии в образовании и науке. – 2019. – № 2. – С. 46–52.
17. Баранов А.В. Виртуальные лаборатории физики как инструмент цифровой дидактики // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: матер. 14 Междунар. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии в образовании и науке», НИТО–2021, Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2021. – С. 419–425.

**Баранов Александр Викторович**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. общей физики  
Новосибирского гос. техн. ун-та (НЭТИ)  
Эл. почта: [baranov@corp.nstu.ru](mailto:baranov@corp.nstu.ru)

Е.С. Костюк

## Разработка программы дополнительного профессионального образования «Планирование и организация НИОКР»

Рассматривается режим дистанционного обучения, его преимущества и недостатки, актуальность разработки курса с применением информационных технологий по направлению «Планирование и организация НИОКР». Описываются первые завершённые шаги, необходимые для разработки программы дополнительного профессионального образования по методу обратного дизайна.

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, online-курс, НИОКР, обратный дизайн, программа дополнительного профессионального образования.

Нельзя не заметить большую роль интернета в жизни современного общества. Множество сфер жизни человека, связанных с передачей и распространением информации, перешли в интернет-формат. В настоящее время в сфере образования наиболее актуальным стал режим дистанционного обучения. Люди всё чаще начали прибегать к повышению уровня своих знаний и навыков через online-курсы.

Дистанционное обучение (ДО) отличается от обычного применением телекоммуникационных технологий, где взаимодействие преподавателя и студента происходит на расстоянии. Такое обучение имеет ряд достоинств: гибкость – самостоятельная организация учебного процесса; параллельность – возможность получать образование без отрыва от трудовой деятельности; дальность действия – нахождение обучающегося на расстоянии от места до образовательного учреждения; осознанное отношение к учебе; стоимость.

К числу недостатков относятся: необходимость в персональном компьютере и доступе в интернет; отсутствие прямого очного общения между обучающимся и преподавателем; проблема аутентификации пользователя при проверке знаний.

Помимо достоинств и недостатков, ДО в России сталкивается с временными трудностями, такими как недостаточная компьютерная грамотность обучающихся и обучаемых; недостаточная развитость информационно-коммуникационных инфраструктур; недостаточная интерактивность курсов; проблема поиска квалифицированных специалистов для создания качественных мультимедийных курсов [1].

Невзирая на все отрицательные стороны ДО, была поставлена цель разработать электронный курс, направленный на получение знаний и навыков в сфере планирования и организации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Актуальность данного направления обусловлена тенденцией внедрения инновационной деятельности на предприятиях, в связи с чем появляется необходимость в персонале, обладающем компетенциями в сфере организации инновационной деятельности.

Главными потребителями данного продукта будут являться люди, работающие в сфере малого бизнеса, имеющие высшее образование, не связанное с инноватикой (например, инженер или менеджер). Так как в отличие от среднего и крупного малый бизнес

более мобилен и гибок с точки зрения адаптации и внедрения инновационных решений, ему гораздо проще осуществить реорганизацию процессов работы в угоду внедряемым инновационным решениям, помогающим ему прежде всего выжить в условиях жесточайшей конкуренции, получить преимущество в борьбе за потребителя. Но одновременно с этим именно малые инновационные предприятия наиболее остро нуждаются в различных видах поддержки, в том числе в компетентных специалистах, поиск которых может оказаться затяжным по времени и непростым в финансовом плане. Решением такой проблемы является обучение по краткосрочным программам дополнительного профессионального образования (ДПО) для овладения необходимыми компетенциями в инновационной сфере.

Представленные на рынке курсы свидетельствуют о спросе на изучение данной темы. Хотя большинство существующих курсов, связанных с НИОКР, имеет очный формат обучения и небольшое количество часов.

Более подробная информация о других программах ДПО представлена в таблице.

Как видно из таблицы, практически все курсы имеют очный формат обучения. Курсы, имеющие дистанционную форму обучения, не совпадают по целям с разрабатываемым курсом.

Цели курса были определены в ходе разработки online-курса методом обратного дизайна.

Обратный дизайн – это метод разработки учебной программы путем постановки целей до выбора методов обучения и форм оценивания. Обратная разработка программы учебной программы обычно включает три этапа [2].

1. Определение желаемых результатов.
2. Определение приемлемых уровней доказательств, подтверждающих достижение желаемых результатов.
3. Разработка мероприятий, которые приведут к желаемым результатам.

Так, согласно данному методу для создания online-курса поставлены и выполнены следующие начальные задачи:

- 1) проанализировать литературу по методикам формирования программ ДПО, а также материалы, связанные с тематиками конкретных создаваемых программ, изучить методику обратного дизайна при создании обучающих программ;

- 2) изучить программы ДПО, представленные на рынке по заданным тематикам, а также схожие;
- 3) подобрать профессиональные стандарты и трудовые функции для новых программ ДПО;

- 4) следуя методу обратного дизайна, определить предполагаемые результаты обучения (РО);
- 5) декомпозировать результаты обучения;
- 6) составить структуру курса.

**Программы ДПО, представленные на рынке, касающиеся НИОКР**

Название	Часы	Форма обучения	Пересечение с разрабатываемым курсом
НИОКР 2020: Правовое регулирование, бухгалтерский и налоговый учет	16	Очная	Правовые аспекты НИОКР. Бухгалтерский учет НИОКР
Управление научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами (НИОКР) Обучение, НИР и НИОКР	32	Очная	Полностью совпадает по целям
Планирование и управление НИОКР	40	Очная	Полностью совпадает по целям
Стратегии коммерциализации НИОКР: оценка, сценарии, продвижение	72	Дистанционная	Нет планирования и организации НИОКР. Дисциплина «Коммерциализация результатов НИР»
Производственная система в НИОКР. Базовый курс	8	Очная	Нет планирования и организации НИОКР. Часть дисциплины «Промышленные технологии и инновации»
Инструменты инновационного мышления	16	Дистанционная	Нет планирования и организации НИОКР. Часть дисциплины «Инновационный менеджмент»
Управление научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами (НИОКР): Повышение квалификации	40	Очная	Практически совпадает по целям
Организация научно-исследовательской деятельности	18	Очная	Полностью совпадает по целям. Ознакомительный курс
Управление научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами (НИОКР)	32	Очная	Полностью совпадает по целям
Нормирование труда на выполнение НИОКР	15	Очная	Нормирование труда на выполнение НИОКР

РО были разработаны на основе нескольких учебных пособий, таких как «Планирование и управление НИР и ОКР» [3], «Организация НИОКР» [4], «Организация и планирование научно-технических исследований и разработок» [5], «Инновационный менеджмент» [6]:

– РО1 – Способность анализировать и оценивать проект (инновацию) как объект управления.

– РО2 – Способность воспринимать, анализировать, обобщать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, патентную документацию.

– РО3 – Способность работать с документацией, формулировать техническое задание, научно-технический отчет по результатам выполненной работы, нормативные документы.

– РО4 – Способность организовать работу персонала, находить и принимать управленческие решения в области организации работ по проекту и нормированию труда.

– РО5 – Способность формировать перспективные и тематические планы изобретательской деятельности и работы по техническому творчеству.

– РО6 – Способность планировать, организовывать научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу и осуществлять контроль результатов.

– РО7 – Способность планировать и управлять ресурсным обеспечением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Структура программы имеет вид оглавления и состоит из таких основных разделов, как основные понятия в области НИОКР, оценка и отбор идей, основы планирования НИОКР, организация и порядок выполнения НИР, организация и порядок выполнения ОКР, интеллектуальная собственность. В допол-

нение к этому определено приблизительное количество учебных часов для каждого раздела, включающих в себя часы на изучение теоретического материала и часы на выполнение практических заданий.

Подводя итог, можно сказать, что разрабатываемый online-курс будет иметь спрос, так как полного совпадения с концепцией нет ни у одного другого курса, представленного сейчас на рынке.

*Литература*

1. Преимущества и недостатки дистанционного обучения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-distantcionnogo-obucheniya/viewer> (дата обращения: 06.09.2021).

2. Лекция: Краткая модель обратного дизайна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.coursera.org/lecture/howto/liektsiia-kratkaia-model-obsratnogho-dizaina-PBeEf> (дата обращения: 11.09.2021).

3. Планирование и управление НИР и ОКР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2033.pdf> (дата обращения: 12.09.2021).

4. Организация НИОКР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://citr.ntnu.ru/upload/FCfinder/files/izdaniya/organizac\\_niokr.pdf](https://citr.ntnu.ru/upload/FCfinder/files/izdaniya/organizac_niokr.pdf) (дата обращения: 12.09.2021).

5. Организация и планирование научно-технических исследований и разработок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://publishing.intelgr.com/archive/research-organization.pdf> (дата обращения: 12.09.2021).

6. Инновационный менеджмент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aup.ru/books/m23/> (дата обращения: 12.09.2021).

**Костюк Екатерина Сергеевна**  
Студентка ТУСУРа  
Эл. почта: [energi\\_22@mail.ru](mailto:energi_22@mail.ru)



С.М. Левин

## Новое поколение выбирает смешанное обучение

Описано исследование, проведённое автором в рамках глобальных исследований о применении электронных инструментов в образовательном процессе высших учебных заведений. В тексте рассмотрены вопросы дистанционной и смешанной форм обучения с учётом современных тенденций цифровой трансформации образования. Актуальность исследования связана с необходимостью оценки восприятия различных образовательных форм студентами, находившимися в течение прошедшего учебного года в формате вынужденного удалённого обучения. Также рассмотрены особенности современного поколения учащихся, использующих цифровые технологии в повседневной жизни как её неотъемлемый атрибут. В качестве метода исследования выбрано статистическое наблюдение, выполненное в форме анонимного опроса. Группа вопросов, имеющих отношение к данной статье, выполнена в форме суждений, оцениваемых по шкале Ликерта, а также выбора предлагаемых вариантов ответа с возможностью дополнения в графе «Другое». В работе приведены полученные результаты и сделанные на их основе выводы.

**Ключевые слова:** дистанционное обучение, смешанное обучение, форма обучения, цифровые технологии в образовании.

Обращаясь практически к любой сфере современной жизни, следует констатировать, что технологии стали её неотъемлемой частью. Образование, которое в ряде стран было обойдено цифровым прогрессом стороной, за прошедшие полтора года стремительно перешло сегодня в высокотехнологичную категорию. Беспрецедентное явление переноса аудиторных занятий в цифровой формат дистанционного обучения, которое можно было наблюдать в 2020 г., дало стимул для внедрения современных технологий и электронных инструментов на всех этапах образовательного процесса.

Следует отметить, что подобная трансформация в значительной степени меняет характер обучения. В последние годы активно развивается культура цифровых классов. Для нынешнего академического и студенческого сообщества компьютерные технологии стали естественным вспомогательным инструментом познания. Слияние традиционной аудитории университета и цифрового класса системы дистанционного обучения становится почти неизбежным [1]. Однако, как уже отмечалось ранее, переход к электронным инструментам и дистанционному формату образовательного процесса не должен преследовать цель дублировать педагогические процессы и методики в виртуальной плоскости [2]. Использование компьютерных технологий может повысить качество образования, но одних технологий для этого недостаточно. Основные проблемы заключаются в обеспечении правильного использования их преимуществ.

Ретроспектива событий последних лет демонстрирует различные точки зрения на данную проблему. К недостаткам асинхронных образовательных инструментов и дистанционного обучения относили физическое отсутствие преподавателя, эмоционально окрашивающего процесс обучения, требование к наличию у студента персонального компьютера, необходимого программного обеспечения и бесперебойного доступа к интернету, проблемы идентификации пользователя во время проверки знаний, высокие требования к самоорганизации студентов, возмож-

ность более поверхностного изучения студентом материала [3, 4], а также сложность разработки дистанционных учебных курсов [4]. С другой точки зрения, информационные технологии как инструмент повышения грамотности облегчают получение знаний о содержании предметной области изучаемых дисциплин, регулируя сложность в соответствии с заранее определенными показателями. Это позволяет преподавателю обеспечивать достижение студентами плановых результатов с учётом индивидуальных познавательных способностей учащихся [5].

Безусловно, сложившаяся в период пандемии COVID-19 обстановка вынужденного дистанционного обучения как практически единственно доступной формы образовательного процесса не может рассматриваться в качестве постоянного явления.

Потребность студентов в социализации [6], необходимость обязательных аудиторных занятий для ряда дисциплин [7], а также применения некоторых педагогических методик, реализуемых более эффективно в аудиториях, нежели дистанционно, говорят о необходимости сохранения элементов традиционного образовательного формата. При этом перспективность дальнейшего развития онлайн-обучения также не стоит отрицать. Группы взрослых работающих студентов, для которых социализация не является значимым фактором, а гибкий график учебного процесса является одной из причин выбора формы обучения, предпочитают, скорее, обучение онлайн. К числу таких учащихся можно отнести и тех, для кого территориальная удалённость учебных заведений высшего образования в сочетании с низким уровнем дохода семьи исключает возможность физического присутствия в университете в период обучения. Если обратиться к Болонскому процессу [8], то дистанционное обучение действительно делает высшее образование более доступным.

Анализируя предпочтения тех, кто вернулся в стены университетов после года социального дистанцирования, можно предположить, что смешанное обучение – наиболее предпочтительная форма обра-

зовательного процесса. Отметим, что к её появлению привело когда-то внедрение интерактивных учебно-методических материалов и инструментов [9], где традиционная система аудиторного образовательного процесса сочетается со специальными цифровыми инструментами [10].

При изучении применения современных технологий в обучении отмечено, что смешанный подход оказывает значительное положительное влияние на успеваемость. Удовлетворенность студентов смешанными курсами может быть выше, чем при традиционном обучении в аудитории, а сама процедура обучения – более эффективной [11]. Однако примем во внимание, что количество исследований студентов университетов как конечных пользователей в контексте смешанного обучения не так велико [12, 13]. Исследователи электронных инструментов уделяли больше внимания преимуществам и проблемам применения технологий в образовательных учреждениях [14].

Элементы современных технологий рассматриваются как естественное содержание повседневности, к которой можно отнести и обучение. Нынешние студенты выросли в цифровом мире и всё чаще именуется его туземцами [15]. Разумно предположить, что электронные элементы педагогики, оцениваемые некоторыми преподавателями как новинка, представляются учащимся само собой разумеющимися. Безусловно, не стоит относиться к технологиям как к субститутам преподавателей высших учебных заведений. Цифровые ресурсы – это вспомогательный набор, позволяющий применять современные педагогические методики и автоматизировать определённый объём ручного труда педагогов и сотрудников университетов, агрегировать данные и т.д. При всей перспективе их использования преподаватели сохраняют определяющую роль в формировании корректного образовательного процесса [16].

#### Метод и цели исследования

Целью исследования, описанного в рамках данной статьи, являлась оценка восприятия студентами очной формы обучения применения дистанционных технологий в образовательном процессе вуза. В качестве метода исследования применено статистическое наблюдение, выполненное в форме анонимного опроса, проведённого путём электронного анкетирования. В опросе приняли участие 594 учащихся, имеющих статус «студент» в системе дистанционного обучения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Помимо сбора общих сведений (возраст, пол), анкета содержала пять групп вопросов, две из которых относились к работе с электронной образовательной информационной системой (ЭИОС) и оценке формы обучения.

Вопросы формулировались в форме суждения, требующего оценки с использованием психометрической шкалы Ликерта [17], а также в вопросительной форме с предложением ответов на выбор или формулировки собственного ответа в графе «Другое». Отбор суждений для шкалы Ликерта произведён в процессе предварительного пилотного исследования.

#### Результаты

При анализе полученных данных установлено, что подавляющее большинство опрошенных входят в возрастную группу 17–25 лет – 92,61% (рис. 1).

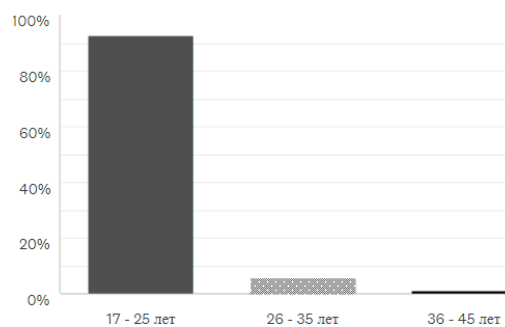


Рис. 1. Возрастные группы респондентов

Превалирующая образовательная программа – бакалавриат (80,17%). Учащиеся магистратуры составили 9,75% от числа опрошенных, специалитета – 8,24%, аспирантуры – 1,34% и дополнительного профессионального образования – 0,5% (рис. 2). Опрос показал распространённость применения преподавателями таких асинхронных инструментов, как лекция, задание и тест системы дистанционного обучения Moodle, наряду с использованием сервиса вебинаров в качестве синхронного.

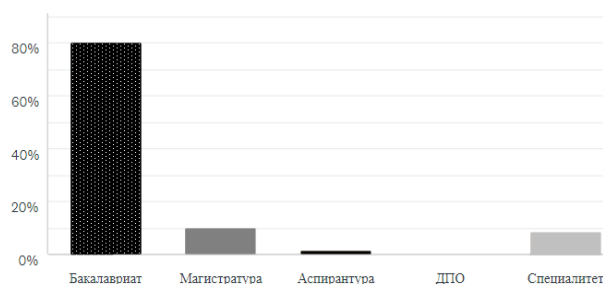


Рис. 2. Образовательные программы респондентов

Большинство опрошенных выбрали в качестве предпочтительной смешанную форму обучения – 58,51%. Очная и дистанционная формы получили по 24,27 и 15,53% соответственно (рис. 3). При этом в возрастной группе 17–25 лет предпочтение форме обучения с применением дистанционного или смешанного форматов обучения отдали 73,23% респондентов, из которых только 14,87% от общего числа опрошенных выбрали полное онлайн-обучение.

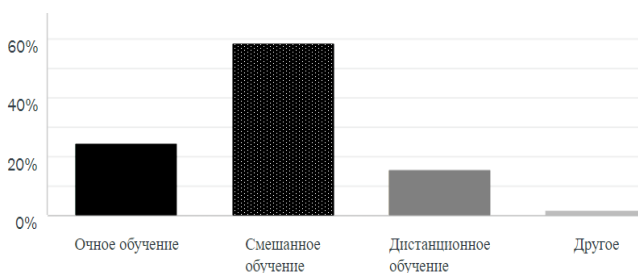


Рис. 3. Предпочитаемые формы обучения

Отдельно следует отметить, что, несмотря на вынужденный переход на удалённое обучение в прошедшем учебном году, почти 63% респондентов со-

гласились с утверждением, что в целом они довольны обучением в университете, и лишь 10,85% ответили отрицательно (рис. 4).

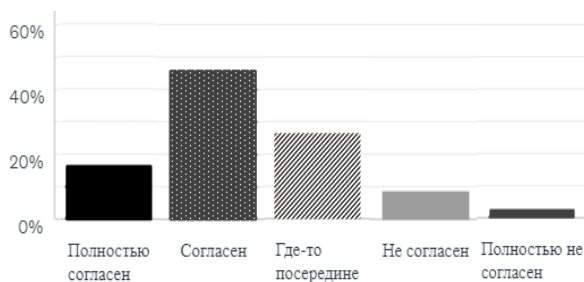


Рис. 4. Оценка удовлетворённости образованием

### Выводы

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что формат смешанного обучения как основной формы в реализации образовательного процесса наиболее предпочтителен для основной группы учащихся (17–25 лет, 92,61% от числа опрошенных). Поскольку такие познавательные психические процессы, как восприятие, память и мышление, более эффективны при субъективном ощущении комфорта, испытываемого студентом, то при студентоцентрированном обучении выбор формата учебного процесса может оказать существенное влияние на его эффективность. Следуя этому положению, необходимо рассмотреть возможность переноса акцента с очного образования на смешанную форму.

### Обсуждение

Полученные результаты ставят современные университеты перед фактом, который настолько очевиден, что иногда совершенно не заметен для некоторых педагогов и администраторов университетов, привыкших к проявлению классической педагогики в стенах вуза. Новые поколения студентов – продукт эпохи цифровой трансформации. За этой общей фразой кроются вполне определённые детали. В частности, рассмотренная возрастная группа учащихся проводит существенную часть своей сознательной жизни в виртуальном пространстве [18]. Мобильные телекоммуникационные устройства входят в их атрибуты повседневного использования, а время, проведённое в виртуальном пространстве, может превышать время цифрового детокса.

Попытки игнорировать подобные изменения в обществе обречены на неудачу, которые в педагогической плоскости могут проявиться в виде малоэффективных результатов обучения. К тому же основная роль профессорско-преподавательского состава связана с образованием, а не воспитанием. Находясь в поиске наиболее результативных методов педагогики, нужно помнить о необходимости разговаривать с учащимися на их языке. Сегодня это язык цифрового мира, требующий выбора современных адаптивных образовательных технологий, реализованных с помощью электронных инструментов. При этом необходимо принимать во внимание, что только те современные ресурсы, которые воспринимаются как

простые в использовании, будут приняты студентами. Полезность также является основным фактором влияния на намерение использования [18], поэтому неочевидная пригодность тех или иных ресурсов может восприниматься учащимися негативно. Попытка копировать аудиторное обучение в дистанционных классах тоже может стать провальной инициативой – разные формы не могут быть тождественны.

Оптимальным для смешанной и дистанционной форм обучения может стать виртуальный класс, наполненный различными электронными ресурсами, включая интерактивные элементы, где асинхронные компоненты эффективно сочетаются с синхронными. Безусловно, в качестве добротного фундамента в такой конструкции должен стать правильно спланированный курс, базирующийся на современных педагогических концепциях.

### Литература

1. Singh Mayengbam Nandakishwor. Inroad of Digital Technology in Education: Age of Digital Classroom // Higher Education for the Future. – 2021. – Vol. 8, No. 1. – P. 20–30.
2. Исакова А.И., Левин С.М. Модели повышения мотивации студентов в образовательном процессе вуза // Инженерное образование. – 2020. – № 28. – С. 20–30.
3. Шестопалов Е.В., Суворова Е.В. Преимущества и недостатки дистанционного обучения // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 6. – С. 61–66.
4. Демцура С.С., Якупов В.Р. Информационные технологии в образовании (на примере применения дистанционных образовательных технологий в российских вузах) // Наукосфера. – 2020. – № 7. – С. 31–36.
5. Ness J. USMA Engineering Psychology Class of 2020 Technology in Education / Stephanidis C. et al. (eds), HCI International 2020. Late Breaking Papers: Cognition, Learning and Games // Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12425. – P. 574–585.
6. Левин С.М. Методы улучшения психического здоровья студентов в условиях вынужденного дистанционного обучения и социального дистанцирования // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2021. – № 1 (40). – С. 66–78.
7. Koleva I., Yoshinov R., Yoshinov B. Evaluation of students' competences in kinesiological and pathokinesiological analysis – a comparative study between distance learning, face-to-face learning and combined learning // ICERI-2020 Proceedings. – IATED, 2020. – P. 2805–2811.
8. Freire I.P., Estrela M.T., Amaral A., Santo J.A.E. The Bologna process and the search for excellence: between rhetoric and reality, the emotional reactions of teachers // Teaching in Higher Education. – 2017. – Vol. 22, № 4. – P. 467–482.
9. Lazar I., Panisoara G. Digital textbooks and the development of students' competencies // Digital education. – Romania: Polirom, 2020. – 271 p.
10. Alammary A. Blended learning models for introductory programming courses: A systematic review // PloS one. – 2019. – Vol. 14, No. 9. – P. 1–26.
11. Law K.M.Y., Geng S., Li T. Student enrollment, motivation and learning performance in a blended learning environment: The mediating effects of social, teaching, and cognitive presence // Computers & Education. – 2019. – Vol. 136. – P. 1–12.
12. Joo Y.J., Park S., Shin E.K. Students' expectation, satisfaction, and continuance intention to use digital textbooks // Computers in Human Behavior. – 2017. – Vol. 69. – P. 83–90.

13. Acosta M.L. et al. Student acceptance of e-learning methods in the laboratory class in Optometry // PloS one. – 2018. – Vol. 13, No. 12. – P. 1–15.

14. Lazar I.M., Panisoara G., Panisoara I.O. Digital technology adoption scale in the blended learning context in higher education: Development, validation and testing of a specific tool // PloS one. – 2020. – No. 15(7). – P. 1–27.

15. Рено А. Цифровые туземцы: что мы знаем о поколении Z, которому очень не нравится устаревшая реальность // Теплица социальных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://te-st.ru/2018/04/17/generation-z-2/>, свободный (дата обращения: 15.09.2021).

16. Атамурадов Ж.Ж. Роль преподавателя в проектировании этапов построения дистанционного обучения // Academy. – 2020. – № 10 (61). – С. 23–25.

17. Joshi A. et al. Likert scale: Explored and explained // British Journal of Applied Science & Technology. – 2015. – Vol. 7, № 4. – 396 p.

18. Bernacki M.L., Greene J.A., Crompton H. Mobile technology, learning, and achievement: Advances in understanding and measuring the role of mobile technology in education // Contemporary Educational Psychology. – 2020. – Vol. 60. – P. 101827

---

**Левин Семён Михайлович**

Канд. юрид. наук, проф. каф. АСУ ТУСУРа

Эл. почта: [levin.sm@asu.tusur.ru](mailto:levin.sm@asu.tusur.ru)

**В.А. Семиглазов, Т.Н. Мосунова, В.А. Акулякова**

## **К вопросу об оценке потенциала конкурентоспособности**

Рассматриваются подходы к оценке потенциала конкурентоспособности предприятия, а также показатели, влияющие на конкурентный потенциал. Выдвигается теория о том, что при овладении универсальными методами вычисления значений показателей возможно использование любого из подходов к оценке потенциала конкурентоспособности.

**Ключевые слова:** оценка потенциала конкурентоспособности, факторы конкурентоспособности.

В современных условиях рынка, чтобы оставаться конкурентоспособными, предприятиям необходимо делать упор на свои преимущества, а это предполагает необходимость оценки потенциала конкурентоспособности. Грамотный подход к оценке конкурентоспособности способствует определению конкурентной стратегии, согласованной с условиями конкретной отрасли, навыками и капиталом, которыми обладает конкретное предприятие.

Конкурентоспособность гарантирует компании безопасность существования и возможность эффективно развиваться впоследствии. Но конкурентоспособность является уже следствием возникновения преимущества у компании. Складывается оно как раз из факторов и потенциалов (маркетингового, инновационного, ресурсного и др.), которые в приведенной сумме формируют конкурентный потенциал.

Во многом соотношение значимости конкурентоспособности и потенциала конкурентоспособности зависит от этапа жизненного цикла предприятия. Так, на начальных этапах важнее наличие потенциала конкурентоспособности, а на поздних этапах возрастает значимость имеющейся фактической конкурентоспособности.

На конкурентный потенциал влияют возможности предприятия, которые можно разделить на внутренние и внешние. Так, внутренние возможности формируют маркетинговый, инновационный, ресурсный и творческий потенциалы, а внешние – маркетинговый, инновационный, ресурсный и рыночный [1]. Обладающие широкими внутренними и внешними возможностями компании способны занять сильную позицию на рынке. При ограниченном спектре внутренних возможностей следует развивать потенциалы, использующие внешние возможности. Аналогично слабое развитие внешних возможностей побуждает компании делать упор на внутренние ресурсы.

Существует множество подходов к оценке потенциала конкурентоспособности чего-либо (товара, услуги, компании). Как правило, это интегральные модели, включающие в себя количественные оценки различных показателей, которые, в свою очередь, складываются из более простых факторов (научно-инновационных, организационных, финансовых, кадровых, маркетинговых, материально-технических, социально-имиджевых). Также к ним относятся, например, рыночная доля, рентабельность

товара, качество товаров, коэффициент текущей ликвидности, коэффициент финансовой устойчивости, коэффициент текучести кадров и т.д.

Потенциал конкурентоспособности организации возможно определить не только имеющимися у нее инновационными возможностями, но и факторами, влияющими на данный потенциал. Для обеспечения благоприятной конкурентной позиции на рынке необходимо рассматривать системные категории, совершенствующие деятельность предприятия.

Научно-инновационные факторы. Первая составляющая представляет точное планирование и осуществление с технической точки зрения для успешного старта. Инновационная составляющая предполагает разработку и введение новых или усовершенствованных продуктов, необходимых потребителям.

Организационные факторы выделяют на первое место рациональную структуру управления функциями менеджмента для достижения сознательных координируемых целей.

Финансовые факторы подразумевают целесообразное ведение бюджета предприятия, выявление финансово благоприятных гибких схем, создание адаптивной ценовой политики.

Кадровые факторы включают создание благоприятной окружающей обстановки для кадрового состава: повышение квалификации, обеспечение мотивационными системами и т.д.

Маркетинговые факторы. Главной задачей является изучение и осуществление действенных маркетинговых ходов, изучение рынка, внешней среды, влияющей на покупательское поведение.

Материально-технические факторы включают механизацию и автоматизацию производства, создание современной материально-технической базы на основе освоения прогрессивных технологий, помогающих занимать современные позиции: сокращать затраты живого труда, сокращать затраты ресурсов, сокращать старое оборудование и т.д.

Социально-имиджевые факторы подразумевают факторы, влияющие на внешний корпоративный имидж, складывающийся в социальной сфере. В группу факторов включены: сохранение окружающей среды, спонсорство, участие в благотворительностях.

В.С. Чекалин и Р.В. Грачев [2] предлагают подход, учитывающий семь групп показателей. Количественная оценка показателей получается путем

опроса экспертов, без использования весовых коэффициентов используется десятибалльная шкала. Так, все показатели принимаются равноценными по влиянию на общий потенциал конкурентоспособности, и формула расчета выглядит следующим образом:

$$ПК = K_{НИ} + K_O + K_{Ф} + K_{К} + K_{М} + K_{МГ} + K_{СИ},$$

где ПК – потенциал конкурентоспособности;  $K_{НИ}$  – научно-инновационный показатель;  $K_O$  – организационный показатель;  $K_{Ф}$  – финансовый показатель;  $K_{К}$  – кадровый показатель;  $K_{М}$  – маркетинговый показатель;  $K_{МГ}$  – материально-технический показатель;  $K_{СИ}$  – социально-имиджевый показатель.

В подходе, предложенном Х.Г. Батовым [3], предлагается вычисление интегрального показателя конкурентоспособности по формуле

$$I_{rg} = \frac{\sum_{j=1}^m K_{knj} \cdot d_j}{\sum_{j=1}^m d_j},$$

где  $d_j$  – коэффициент весомости каждого компонента конкурентоспособности предприятия, определяемый экспертным путем;  $m$  – количество показателей конкурентоспособности предприятия;  $K_{knj}$  – частный индикатор, характеризующий отдельные показатели конкурентоспособности предприятия.

В ходе применения данной методики исследуются различные области деятельности предприятия, при этом анализируются такие аспекты, как рыночная активность, материально-техническая сфера, организационно-управленческая сфера, инвестиционная сфера и финансовая сфера. Определяющим фактором повышения конкурентного статуса предприятия принята конкурентоспособность продукции.

Автор разделяет 80 факторов на шесть групп, возможно и иное разделение на более мелкие группы, а также выделение иных приоритетных показателей.

Различные подходы к количественной оценке конкурентоспособности подразумевают операции приведения (нормирования) показателей (финансовых, рыночных и т.д.) к одному диапазону измерения. Показатели, в свою очередь, определяются совокупностью более мелких факторов и вычисляются с помощью различных методов.

Так, например, некоторые факторы, которые могут быть отнесены к показателям рыночной активности и конкурентоспособности продукции, представлены в таблице.

Алгоритм Н.С. Исаевой и Ю.С. Валеевой [4] по оценке потенциала конкурентоспособности предприятия построен на использовании показателей с учетом их весовых коэффициентов. В основе идеи рассматривается четыре составляющие конкурентоспособности потенциала предприятия, проходящие оценку данных.

**Факторы, отнесенные к показателям рыночной активности и конкурентоспособности продукции**

Рыночная активность	Востребованность выпускаемой продукции
	Доля рынка
	Степень популярности предприятия и привлекательности его продукции
	Экономичность производственных издержек
	Позиционирование на мировом и внутреннем рынках
	Развитость кооперационных связей
	Степень интенсивности иностранной конкуренции
Конкурентоспособность продукции	Уровень концентрации рынка и др.
	Качество
	Ширина ассортимента
	Новизна
	Затратность производства
	Уровень послепродажного сервиса, наличие гарантии

Формула расчета составляющих и коэффициента потенциала конкурентоспособности предприятия

$$K_{кп} = 0,15V_m + 0,29V_{фп} + 0,23V_t + 0,33V_{и},$$

где  $K_{кп}$  – потенциал конкурентоспособности предприятия;  $V_m$  – эффективность маркетинговой составляющей и конкурентоспособности товара;  $V_{фп}$  – производственно-финансовый потенциал предприятия;  $V_t$  – трудовые возможности предприятия;  $V_{и}$  – инновационный потенциал предприятия; 0,15; 0,29; 0,23; 0,33 – принятые авторами коэффициенты весомости критериев.

Для обоснования весовых коэффициентов рассчитывается динамический коэффициент возможностей потенциала конкурентоспособности, характеризующий вклад в суммарный уровень использования потенциала предприятия; возраст данных, временной горизонт исследования; цепной темп роста показателя, характеризующего использование основных составляющих конкурентоспособного потенциала.

Количественная модель сравнения [5] позволяет оценить идею / продукт совокупностью параметров, имеющих весовые коэффициенты. Метод использует характеристику параметров для расчета и весовые коэффициенты. В качестве параметров могут быть выбраны различные характеристики продукта, не обязательно выраженные количественно (например, вербальные оценки параметра), поскольку при проведении нормировки они так или иначе преобразуются в количественные.

Интегрально качество идеи оценивается суммой произведений безразмерных параметров на соответствующий приоритет, рассчитываемый из весовых коэффициентов.

$$M_j = \sum_{i=1}^k \mu_i \alpha_i,$$

где  $M_j$  – качество идеи,  $k$  – количество сравниваемых параметров,  $j$  – рассматриваемая идея,  $\mu_i$  – безразмерные параметры,  $\alpha_i$  – приоритет, рассчитываемый из весовых коэффициентов.

Если трактовать параметры для расчета как случайные значения параметров идеи, а вес как вероятность этой случайной величины, то качество идеи можно характеризовать как математическое ожидание. Так, возможно подсчитать отклонение от идеальной величины (разность математического ожидания идеальной величины, равной единице, и математического ожидания исследуемого продукта).

Также идеи в количественном методе сравниваются по коэффициенту вариации, который отражает степень колеблемости качества идеи, и по нескольким выбранным среди всех наиболее важным параметрам (сумма произведений нескольких самых важных параметров на весовой коэффициент). Для каждого полученного параметра необходимо произвести нормировку, чтобы получить возможность производить корректные математические операции.

Далее суммируются все полученные значения превосходства по всем критериям. Таким образом, количественный метод использует четыре интегральных параметра (математическое ожидание, отклонение от идеала, коэффициент вариации и окупаемость).

Подход к оценке конкурентоспособности предприятия, предложенный Р.А. Фатхутдиновым [6], включает использование весовости товаров и рынков, на которых они реализуются:

$$K_{\text{орг}} \geq \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_j \cdot K_{ij} \rightarrow 1,$$

где  $K_{ij}$  – конкурентоспособность  $i$ -го товара на  $j$ -м рынке;  $i$  – удельный вес  $i$ -го товара организации в объеме продаж за анализируемый период, определяется долями единицы;  $i$  – значимость рынка, на котором представляется товар. Значимость рынка определяется следующим образом: для развитых стран (Канада, США, Япония, страны Евросоюза) рекомендована значимость, равная 1; для остальных стран – 0,7; для внутреннего рынка – 0,5.

Удельный вес в объеме продаж определяется как

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V},$$

где  $V_i$  – объем продаж  $i$ -го товара за период в млн. ден. ед.;  $V$  – общий объем продаж организации за период в млн ден. ед.

Известно, что факторы, влияющие на потенциал конкурентоспособности, могут быть найдены разными методами. Так, например, рыночную долю можно оценить методом определения объема рынка, степень популярности предприятия и привлекательность продукции – методом опроса или методом экспертных оценок.

Таким образом, изучив методы оценки факторов конкурентоспособности, возможно без труда вычислить показатели, из которых в итоге складывается потенциал конкурентоспособности, и в короткие сроки овладеть любым из подходов его оценки. В групповом проекте «Разработка программ ДПО по профилю кафедры» [7] создается курс, который позволит обучающимся освоить различные методы и применять их в использовании любого из подходов или в создании собственного.

### Литература

1. Конкурентный потенциал предприятия: модель и стратегии развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=3801> (дата обращения: 16.09.2021).
2. Чекалин В.С. Оценка потенциала конкурентоспособности организации сферы концертно-выставочных услуг // В.С. Чекалин, Р.В. Грачев // Вестник ТвГУ. Сер.: Экономика и управление (Тверь). – 2013. – № 3 – С. 183–193.
3. Батов Г.Х. Комплексная оценка потенциала и конкурентоспособности перерабатывающих предприятий АПК региона / Г.Х. Батов, Ю.В. Пучкина, Р.А. Чомаева // Экономика и управление. Экономическое право. – 2012. – С. 161–166.
4. Исаева Н.С. Алгоритм анализа потенциала конкурентоспособности предприятия / Н.С. Исаева, Ю.С. Валева // Вестник ВГУ. Сер.: Экономика и управление. – 2007. – № 1. – С. 78–82.
5. Семиглазов А.М., Семиглазов В.А. Модель отбора новых идей для их реализации в инновационном бизнесе // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2, ч. 1. – С. 336–341.
6. Фатхутдинов Р.А. Управление конкурентоспособностью организации: учеб. – 2-е изд. – М.: Эксмо, 2005. – 544 с.
7. Мосунова Т.Н. Подбор профессиональных стандартов для разработки программы дополнительного профессионального образования «Количественные методы оценки конкурентоспособности инноваций» // Т.Н. Мосунова, В.А. Акулякова, Д.Е. Алексеева // Научная сессия ТУСУР–2021: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 19–21 мая 2021 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 2. – С. 115–118.

### Семиглазов Вадим Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент каф. управления инновациями ТУСУРа  
Эл. почта: [vadim.tusur@mail.ru](mailto:vadim.tusur@mail.ru)

### Мосунова Татьяна Николаевна

Студентка ТУСУРа  
Эл. почта: [mosunova2013@mail.ru](mailto:mosunova2013@mail.ru)

### Акулякова Венера Александровна

Студентка ТУСУРа  
Эл. почта: [Santee220@gmail.com](mailto:Santee220@gmail.com)

*Секция 18*

**ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ**

*Председатели секции – **Курячий Михаил Иванович**, доцент каф. ТУ, канд. техн. наук,  
**Капустин Вячеслав Валериевич**, доцент каф. ТУ, канд. техн. наук*





М. Назарбек, Т.М. Акаева, А.А. Новгородов

## Исследование методов и алгоритмов оценки пространственного разрешения цифровых телевизионных изображений

Представлена программная реализация метода для расчета контрастно-частотных характеристик цифровых телевизионных изображений. Выполнено сравнение реализованного алгоритма с существующими программными обеспечениями, разработанный алгоритм MTF Lab соответствует аналогам по точности измерения контрастно-частотной характеристики.

**Ключевые слова:** оценка, изображение, контрастно-частотная характеристика, телевизионные линии, камера.

При приеме видеоданных и изображении в телевизионных измерительных системах не всегда возможно достичь желаемого качества выходного изображения, так как на него могут влиять различные факторы, возникающие в процессах приема, передачи и хранения.

Необходимо использовать специальные методы и алгоритмы для решения задач в области обработки цифровых изображений, а также выполнять оценку качества изображений с целью улучшения их визуального восприятия и увеличения информативности. Одни алгоритмы направлены на устранение одного из видов искажений изображений, другие позволяют оценить качество изображений по определенным критериям.

В современном мире многие специалисты в этой области проводят эксперименты и исследования, как улучшить не только качество изображения, но и повысить вычислительную мощность и эффективность алгоритмов.

Одновременно с выбором основных параметров цифровых ТВ-систем обычно формулируют требования к тракту в целом и отдельным его звеньям, а также определяют критерии оценки их работоспособности. При этом необходимо использовать методы измерений, позволяющие наиболее эффективно выявить специфические искажения в комплексе цифровой аппаратуры [1, 2].

### Цель исследования

Выполнение программной реализации алгоритма для расчета контрастно-частотной характеристики (КЧХ) изображений, а также сравнение реализованного алгоритма с существующими аналогами.

### Программная реализация алгоритма для расчета контрастно-частотных характеристик изображений

За основу было взято тестовое изображение с разрешением 720×576, искусственно интерполированное в программном обеспечении AverTV до значений 1024×768, 1280×720, 1280×960, 1920×1080, 4000×3000 элементов. AverTV – устройство для просмотра аналогового телевидения, которое позволяет расширить мультимедийные возможности компьютера, при том формат видео на выходе соответствует 4:3 и 16:9.

На рис. 1 представлено окно программной реализации алгоритма для расчета контрастно-частотных характеристик изображений.

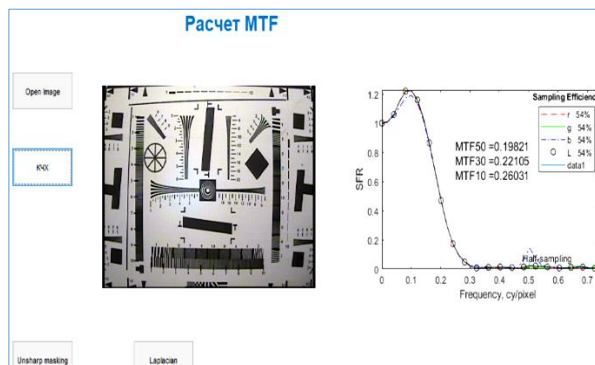


Рис. 1. Окно программы для расчета КЧХ

Для определения разрешающей способности изображений необходимо измерить функцию взаимосвязи контраста среди черных и белых линий от количества телевизионных линий в кадре, т.е. контрастно-частотную характеристику (КЧХ) изображения. В качестве инструмента для измерения разрешающей способности изображений авторами разработан алгоритм на основе функций свободно распространяемого вычислительного модуля «sfrmat3», разработанного Питером Бернсом [3]. Данный модуль основан на методике стандарта ISO 12233 [4], а также содержит некоторые улучшения, повышающие стабильность результатов измерений даже в случае тестирования изображений очень низкого качества.

Данный алгоритм также был использован после обработки фильтром «нерезкого маскирования» и фильтром «Лапласиан» для изображений, полученных с использованием активно-импульсной телевизионной измерительной системы [5].

На рис. 2 представлены камеры, с которых получены исследуемые изображения.



Рис. 2. Видеокамеры, используемые в эксперименте

**Сравнение реализованного алгоритма с существующими аналогами**

На рис. 3 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой ACV Infinity SCV416M.

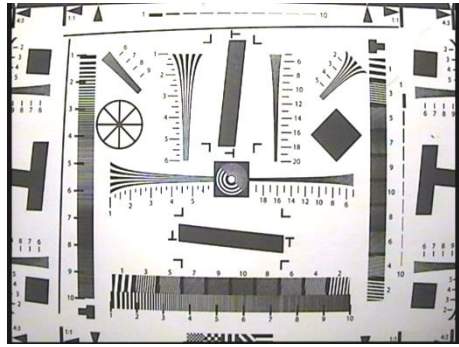


Рис. 3. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 4:3, снятое на камеру ACV Infinity SCV416M

На рис. 4 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

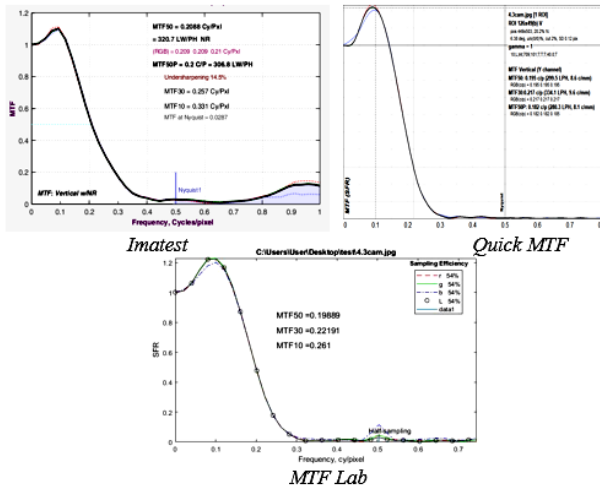


Рис. 4. КЧХ, камеры ACV Infinity SCV416M с отношением сторон 4:3

На рис. 5 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой VAC-136-USB.

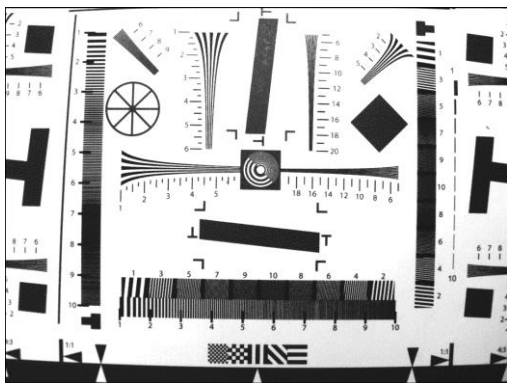


Рис. 5. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 4:3, снятое на камеру VAC-136-USB

На рис. 4 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

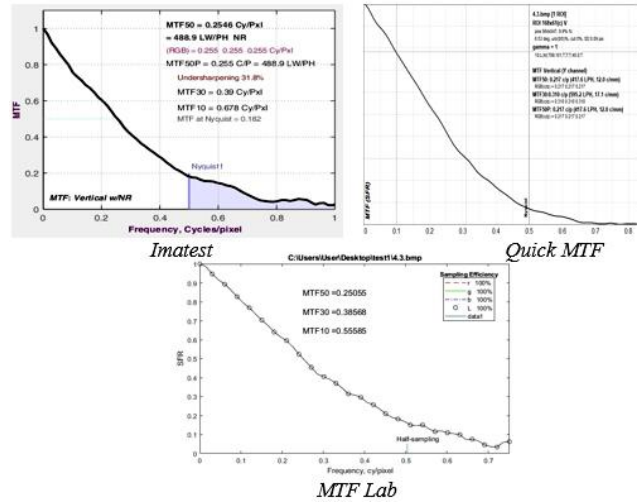


Рис. 6. КЧХ, камеры VAC-136-USB с отношением сторон 4:3

На рис. 7 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой Huawei Nova 5T.

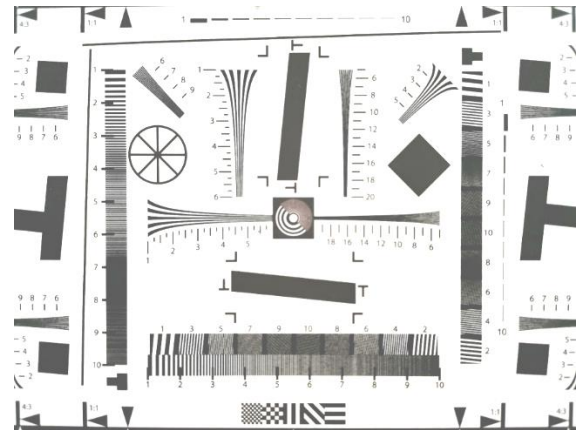


Рис. 7. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 4:3, снятое на камеру Huawei Nova 5T

На рис. 8 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

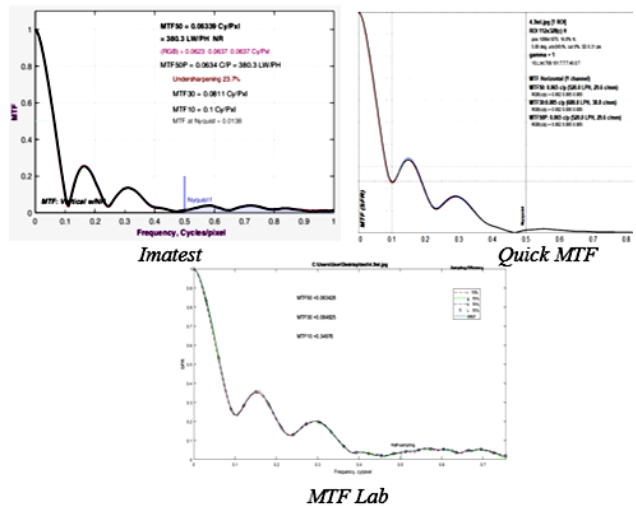


Рис. 8. КЧХ, камеры Huawei Nova 5T с отношением сторон 4:3

На рис. 9 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой ACV Infinity SCV416M.

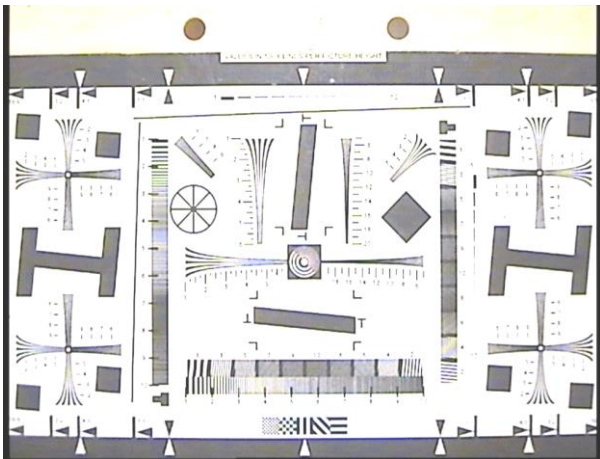


Рис. 9. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 16:9, снятое на камеру ACV Infinity SCV416M

На рис. 10 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

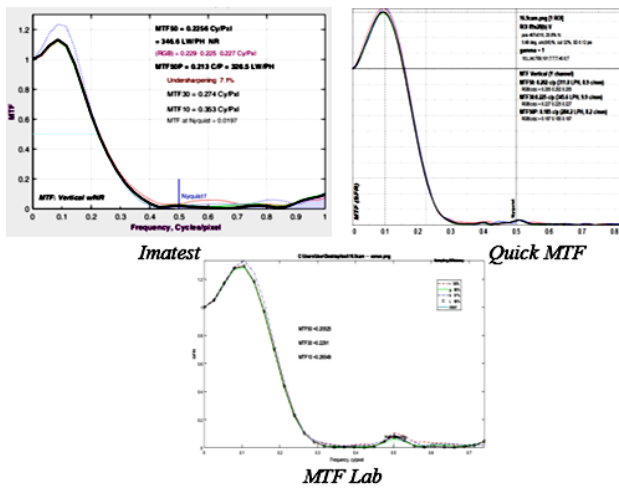


Рис. 10. КЧХ, камеры ACV Infinity SCV416M с отношением сторон 16:9

На рис. 11 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой VAC-136-USB.

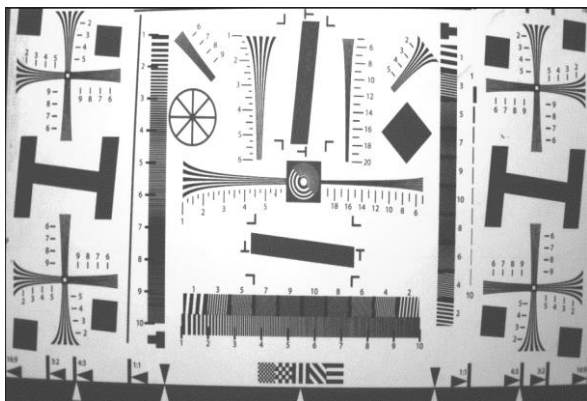


Рис. 11. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 16:9, снятое на камеру VAC-136-USB

На рис. 12 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

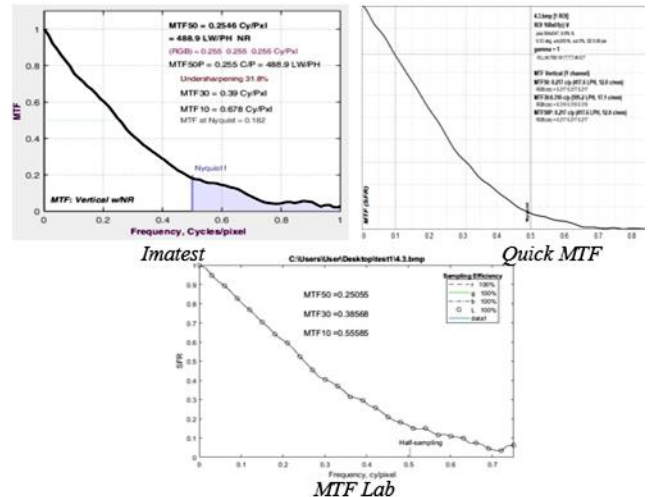


Рис. 12. КЧХ, камеры VAC-136-USB с отношением сторон 16:9

На рис. 13 показано сфокусированное тестовое изображение, снятое камерой Huawei Nova 5T.

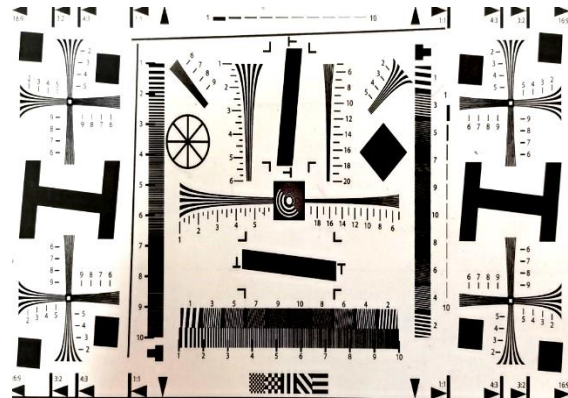


Рис. 13. Изображение ISO 12233 с отношением сторон 16:9, снятое на камеру Huawei Nova 5T

На рис. 14 представлены графики КЧХ, сравнение реализованного алгоритма MTF Lab с существующими аналогами Imatest и Quick MTF.

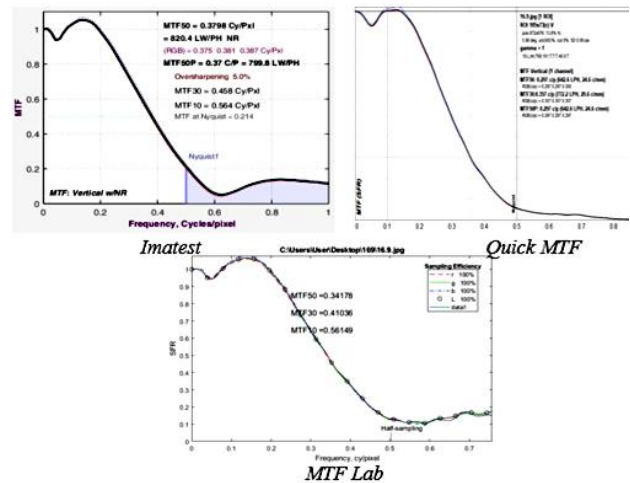


Рис. 14. КЧХ, камеры Huawei Nova 5T с отношением сторон 16:9

Максимально возможное количество телевизионных линий (ТВЛ) будет получено, если одна линия попадает на один пиксель, что соответствует значению 0,5 цикла на пиксель. Отсюда можно получить выражение для перевода числа циклов на пиксель в ТВЛ [6]:  $ТВЛ = (C/P/0.5) \times \text{разрешение изображения}$ ; C/P – число «циклов на пиксель».

Для более подробного анализа все полученные результаты приведены в таблице.

**Результаты эксперимента,  
полученные с помощью различных видеокамер**

ПО	ACV Infinity SCV416M	VAC-136- USB	Huawei Nova 5T
ТВЛ (50) для сфокусированного			
Imatest (4:3)	320,7	488,9	380,3
Quick MTF (4:3)	299,5	417,6	390
MTF Lab (4:3)	305,5	481	380,5
ТВЛ (50) для расфокусированного			
Imatest (4:3)	143,4	110,7	109,6
Quick MTF (4:3)	149,8	100,8	132
MTF Lab (4:3)	146,6	97,5	108,39
ТВЛ (50) для сфокусированного			
Imatest (16:9)	346,6	488,9	820,3
Quick MTF (16:9)	311	331,2	642,6
MTF Lab (16:9)	315,26	404,1	738,2
ТВЛ (50) для расфокусированного			
Imatest (16:9)	108,7	200,4	114,2
Quick MTF (16:9)	93,6	199,7	118,8
MTF Lab (16:9)	93	202,7	118,4

В данной таблице представлены значения пространственного разрешения цифровых телевизионных изображений, за основу было взято тестовое изображение ISO 12233, снятое с разных видеокамер, с разными соотношениями сторон, далее изображение подвергалось фокусировке и расфокусировке, после этого с помощью программного обеспечения Imatest, Quick MTF и разработанного алгоритма MTF Lab снимались контрастно-частотные характеристики и полученные результаты оценивались по уровню КЧХ в 50%.

Исходя из полученных данных в таблице, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм MTF

Lab соответствует по точности измерения КЧХ аналогам. В перспективе планируется разработать полноценное ПО для оценки пространственного разрешения цифровых телевизионных изображений в реальном времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 27-79-10200 в ТУСУРе.

#### Литература

1. Компоненты MFT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html> (дата обращения: 1.09.2021).
2. Салыкова Д.А. Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов инверсной фильтрации / Д.А. Салыкова, А.Н. Утемисов, В.В. Капустин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 39–42.
3. Sfrmat3. Analysis for digital camera and scanner [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3\\_post/doc/sfrmat3.html](http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3_post/doc/sfrmat3.html) (дата обращения: 3.09.2021).
4. ISO12233 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12233:ed-2:v1:en>, свободный (дата обращения: 5.09.2021).
5. Назарбек М. Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионных измерительных систем // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2021», Томск, 19–21 мая 2021 г.
6. Imatest Documentation by Norman Koren [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imatest.com/docs/sharpness/> (дата обращения: 6.09.2021).

#### Назарбек Мадияр

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [nazarbekmadiar@gmail.com](mailto:nazarbekmadiar@gmail.com)

#### Акаева Татьяна Максимовна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [ttnakaeva@gmail.com](mailto:ttnakaeva@gmail.com)

#### Новгородов Александр Александрович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [alex4ndr.novgorodov@yandex.ru](mailto:alex4ndr.novgorodov@yandex.ru)

Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин, Н.А. Бородина

## Оценка влияния джиттера управляющих импульсов и шума фотоприемника на точность измерения дальности АИ ТИС

Представлены результаты моделирования и оценки влияния джиттера управляющих импульсов и шума фотоприемника на точность измерения дальности активно-импульсной телевизионной измерительной системой. Приводится описание принципа действия активно-импульсных телевизионных измерительных систем, а также принципа измерения дальности при помощи многозонного метода измерения дальности. Приведен краткий обзор источников шума изображений, формируемых активно-импульсными телевизионными измерительными системами. Результаты моделирования показали зависимость ошибки измерения дальности от значения величины джиттера управляющих импульсов и шума фотоприемника. Точность измерения дальности уменьшается с увеличением значений джиттера управляющих импульсов и шума фотоприемника.

**Ключевые слова:** активно-импульсная телевизионная измерительная система, активная зона видения, моделирование, метод измерения дальности, джиттер, аддитивный белый гауссов шум.

### Активно-импульсные телевизионные измерительные системы

Дистанционное определение дальности является важной задачей в современных технологиях позиционирования объектов в пространстве. Существующие методы и средства способны обеспечивать измерение расстояний до объектов интереса в заданных условиях с требуемой точностью.

К классу приборов, использующих активный метод для определения дистанции до объектов наблюдения, относятся активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС). Основным применением таких систем является обнаружение и распознавание объектов в сложных условиях видения (дым, туман, дождь, снег и т.п.) за счет подавления помехи обратного рассеяния. Измерение расстояний до объектов в АИ ТИС обеспечивается за счет принципов их работы и конструктивных особенностей.

Принцип работы АИ ТИС представлен на рис. 1.

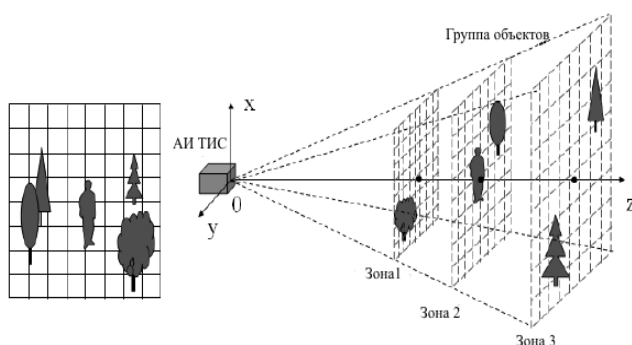


Рис. 1. Принцип работы АИ ТИС

Принцип работы системы заключается в подсвете объектов интереса лазерным излучателем и приеме отраженного излучения с задержками, соответствующими времени прохождения света до объекта и обратно. Таким образом, фотоприемник системы принимает световое отражение лишь от объектов интереса, при этом игнорируя отражение от помех. Такая особенность позволяет отсечь помеху обратного рассеяния в виде отраженного светового излучения от пыли, тумана, снега и т.п. [1].

Метод обеспечивает визуализацию пространства в виде узкого слоя, отсекая при этом близкие помехи и фон за объектом. Полученное изображение дает информацию об отражательной способности наблюдаемого объекта и расстоянии до него [2].

Задачи, решаемые АИ ТИС, определяют основные сферы применения таких систем, к которым относятся навигация беспилотных транспортных средств, обеспечение безопасности вождения транспортных средств в сложных условиях видимости, проведение поисково-спасательных работ, ориентирование на местности и многие другие.

### Измерение дистанции АИ ТИС

Наблюдаемый слой пространства системой принято называть активной зоной видения (АЗВ) [3, 4]. АЗВ описывает изменение распределения световой энергии в зависимости от расстояния наблюдения и прозрачности среды, в которой распространяется излучение [5].

Форма АЗВ представляет собой свертку форм импульса подсвета и стробирования фотоприемного устройства АИ ТИС. Таким образом, ее вид зависит от длительностей этих импульсов и их формы. При равных по длительности прямоугольных импульсах форма АЗВ будет описываться «треугольником» (рис. 2), а в случае неравенства длительностей – «трапецией» [6].

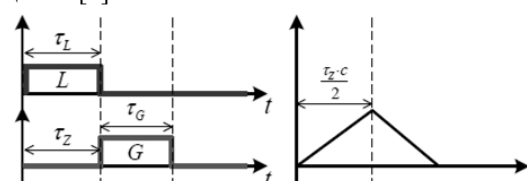


Рис. 2. Форма АЗВ при равных импульсах подсвета ( $\tau_L$ ) и стробирования фотоприемника ( $\tau_G$ ) при задержке стробирования ( $\tau_z$ ), равной импульсу подсвета

Исходя из принципов работы, применяются различные методы определения расстояний, реализуемые АИ ТИС. Одним из таких методов является многозонный метод измерения дальности (ММИД).

Многозонный метод предполагает интеграцию экспозиций фотоприемного устройства, что позво-

ляет в широких пределах регулировать динамический диапазон определения расстояний без изменения длительности импульса подсвета. Метод основан на формировании множества характерных АЗВ и их суммировании со сдвигом по дистанции. Далее производится деление полученной суммы на первую из этих зон. Полученный линейный участок используется в качестве линейной измерительной функции для измерения дальности до объектов.

Таким образом, функция развертки по дальности представляет собой зависимость яркости объекта интереса от его дальности. Другими словами, в ММИД развертка по дальности реализуется путем деления яркости объекта в суммарной зоне на яркость объекта в первой зоне (рис. 3).

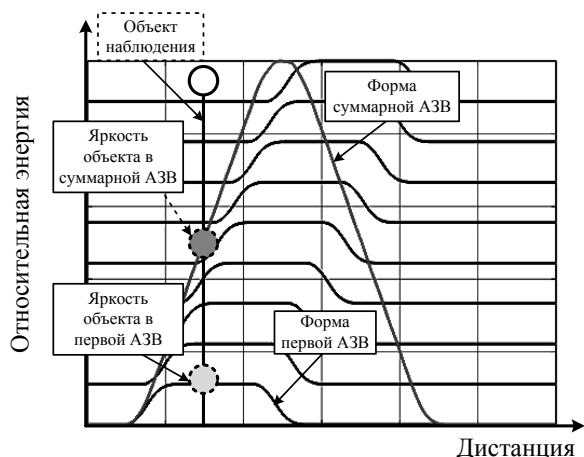


Рис. 3. Принцип формирования суммарной АЗВ ММИД

Для моделирования АЗВ и алгоритмов измерения дальности в АИ ТИС разработана программная модель, позволяющая производить построение формы АЗВ по заданным импульсам подсвета и стробирования фотоприемника, а также определять оценку влияния параметров системы и способов измерения на ошибку измерения дальности до объектов [7].

#### Источники шума изображений, формируемых АИ ТИС

Специфические шумы и помехи изображений, формируемых АИ ТИС, обусловлены принципом работы отдельных устройств, входящих в систему. К аддитивным составляющим шума можно отнести нормальный шум ПЗС-датчика и стационарную часть шума электронно-оптического преобразователя (ЭОП), применяющегося для усиления яркости изображения [8].

Заметный вклад в величину отношения сигнал / шум вносит ряд параметров ЭОП, зависящих от его конструктивных особенностей и принципов работы. Квантовый выход фотокатода ЭОП, как правило, меньше единицы. Поэтому данный процесс можно воспринимать как случайный. Конструкция ЭОП может влиять на потери фотоэлектронов в промежутке «фотокатод–микроканальная пластина (МКП)», к примеру, наличие или отсутствие ионно-барьерной пленки. Умножение фотоэлектронов в МКП соответственно приводит к увеличению шума. Люминофор-

ный экран обладает собственной шумовой характеристикой. Потоки электронов в темновом режиме и оптическая обратная связь оказывают влияние на уровень темнового свечения экрана [9].

Двумя основными компонентами шума, присущего ПЗС-матрицам, являются шум считывания и квантовый шум фотонов. Природа квантового шума связана с тем, что кванты света распределяются в пространстве и времени случайным образом. Статистика фотонов, попадающих на приемник, описывается распределением Пуассона. Точность определения количества электронов, накопленных в ячейке, равна квадратному корню из их числа. Шум считывания определяется схемой матрицы, которым можно пренебречь при большом световом потоке. При этом когда в матрице накапливается малое количество электронов, шум считывания оказывает существенное влияние на формируемый сигнал изображения.

Одновременное действие множества случайных процессов преобразовательных устройств АИ ТИС обуславливает присутствие шумов в изображениях.

Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, сумма независимых случайных величин, подчиненных любым законам распределения, будет иметь закон распределения, близкий к нормальному [10].

#### Моделирование и оценка влияния аддитивного белого гауссовского шума на точность измерения дальности АИ ТИС

Аддитивный белый гауссов шум (АБГШ) – это случайный процесс с гауссовским распределением плотности вероятности, основными параметрами которого являются математическое ожидание, характеризующее среднее значение, а также СКО, характеризующее рассеяние значений относительно среднего.

Для измерения дальности в ММИД используется кадр с суммарной АЗВ и кадр с первой АЗВ. Форма каждой из этих АЗВ описывается массивом значений средних яркостей кадров, соответствующих расстоянию в пределах АЗВ.

Таким образом, для моделирования влияния АБГШ на ошибку измерения дальности ММИД необходимо к каждому значению массивов кадра первой АЗВ и суммарной АЗВ добавить случайное значение АБГШ с нулевым математическим ожиданием и заданным значением СКО.

Моделирование ММИД проводилось при следующих параметрах: длительность импульса подсвета 30 нс, импульса стробирования – 140 нс. Длительность начальной задержки стробирования 40 нс. Рассмотрено два случая ММИД: 20 зон с шагом 5 нс, 9 зон с шагом 15 нс. Для каждого из случаев были рассмотрены варианты влияния АБГШ с СКО, равным 0,1; 0,3 и 0,5.

На рис. 4 представлен общий вид форм АЗВ без влияния АБГШ с учетом влияния закона обратных квадратов.

На рис. 5 представлен график рассчитанной развертки по дальности (включая опорную линейную функцию) с учетом влияния АБГШ с СКО, равным 0,1 для 20-зонного ММИД.

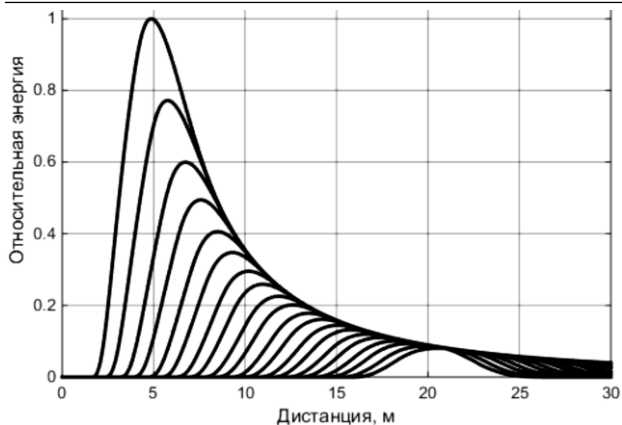


Рис. 4. Формы 20 АЗВ с учетом влияния закона обратных квадратов

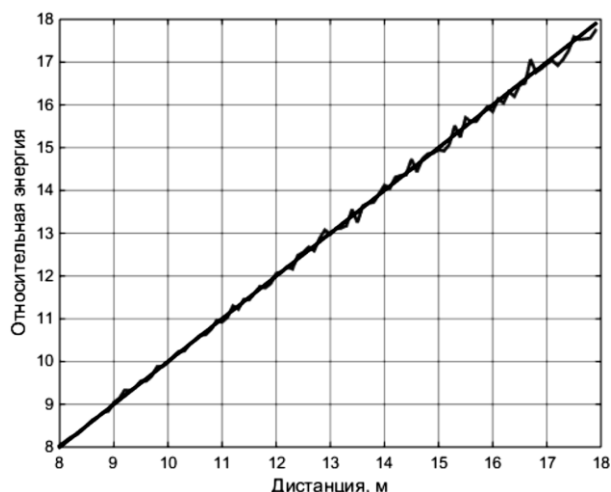


Рис. 5. График рассчитанной развертки по дальности с учетом влияния АБГШ с СКО, равным 0,1

На рис. 6 представлен график ошибки линейности с учетом влияния АБГШ с СКО равным 0,1 для 20-зонного ММИД, представляющий собой разность рассчитанной и опорной линейной измерительной функций.

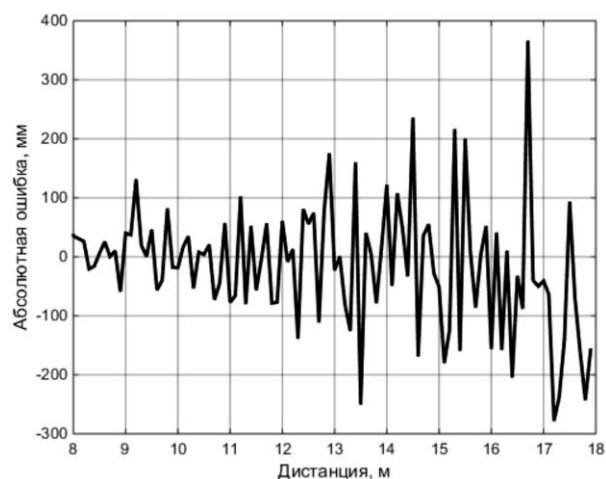


Рис. 6. График ошибки линейности с учетом влияния АБГШ с СКО, равным 0,1

В табл. 1 отражены результаты моделирования 20-зонного и 9-зонного ММИД с учетом влияния АБГШ на ошибку измерения дальности.

Таблица 1  
Результаты моделирования влияния АБГШ на ошибку измерения дальности ММИД

СКО шума	0	0,1	0,3	0,5
СКО ошибки 20 зон, м	0,014	0,10	0,31	0,51
СКО ошибки 9 зон, м	0,025	0,15	0,43	0,79

Результаты моделирования показали, что увеличение значения СКО АБГШ приводит к увеличению ошибки измерения дальности. Как видно из приведенных выше графиков, влияние закона обратных квадратов на кривизну АЗВ приводит к увеличению ошибки измерения дальности с увеличением дистанции из-за уменьшения амплитуды АЗВ при равной величине уровня АБГШ на всей ширине зоны.

**Моделирование и оценка влияния джиттера импульсов стробирования фотоприемника и подсвета на точность ММИД**

Большое влияние на точностные характеристики реальной аппаратуры, работающей с короткими импульсами и малыми временами задержек между ними, оказывают нестабильность частоты опорного генератора и нестабильность задержки сигналов в цифровых схемах. Случайные отклонения положений фронтов формируемых импульсов по оси времени называются джиттером [11].

Для алгоритмов измерения дальности в программной модели реализована возможность задания джиттера длительности импульса подсвета, задержки импульса стробирования, а также длительности стробирования. Приращение длительности и задержки импульсов выбираются с шагом 0,1 нс согласно равномерному закону распределения. Значения учета джиттера выбираются из диапазона, ограниченного заданным числом в положительную и отрицательную области его значений.

Моделирование и оценка влияния джиттера импульсов стробирования фотоприемника и подсвета на точность ММИД проводились при длительности импульса подсвета, равной 30 нс, длительности импульса стробирования фотоприемника 150 нс. Начальная задержка стробирования 40 нс, шаг по задержке стробирования 15 нс, при количестве зон, равном 9.

Моделирование проводилось для восьми разных диапазонов значений джиттера длительности импульса подсвета, задержки импульса стробирования, а также длительности стробирования. Равное значение диапазона джиттера задавалось для всех параметров. Значения при этом выбираются из диапазона, ограниченного заданным числом в положительную и отрицательную области его значений.

На рис. 6 представлен график ошибки линейности кривой развертки по дальности при величине джиттера 0 нс.

На рис. 7 представлен график ошибки линейности кривой развертки по дальности при величине джиттера 0,05 нс.

Для каждой величины джиттера было зафиксировано значение СКО ошибки линейности. В табл. 2 представлены значения СКО ошибки линейности в зависимости от изменения величины джиттера.



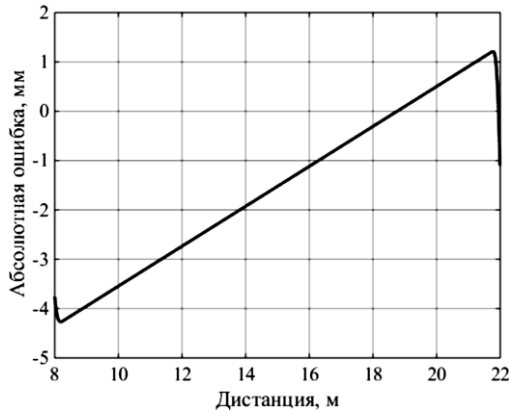


Рис. 7. График ошибки линейности кривой развертки по дальности при величине джиттера 0 нс

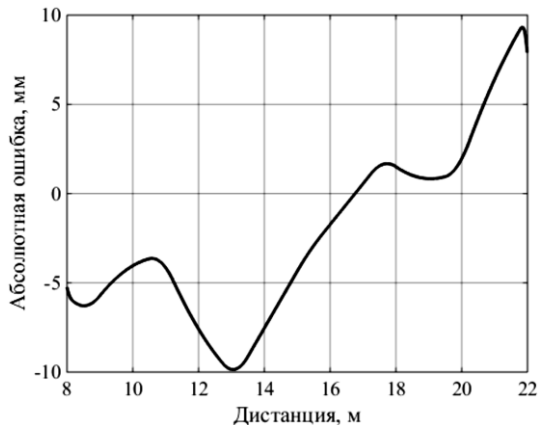


Рис. 8. График ошибки линейности кривой развертки по дальности при величине джиттера 0,05 нс

Таблица 2  
Значения СКО ошибки линейности в зависимости от изменения величины джиттера

Величина джиттера, нс	СКО ошибки линейности, м
0	0,0022
0,05	0,0054
0,1	0,0089
0,2	0,0128
0,4	0,0354
0,6	0,065
0,8	0,074
1	0,083

Из табл. 2 видно, что при увеличении величины джиттера увеличивается СКО ошибки линейности кривой развертки по дальности. В современных системах значения джиттера могут не превосходить 0,05 нс [12]. Поэтому для систем, использующих данный метод измерения дальности, величина потенциальной ошибки определения дальности не превышает порядка единиц миллиметров.

#### Заключение

Рассмотрены примеры моделирования ММИД с учетом влияния АБГШ на ошибку измерения дальности. В случае 20-зонного ММИД при увеличении СКО шума от 0 до 0,5 наблюдается увеличение СКО ошибки определения дальности от 0,014 до 0,51 м. Для 9-зонного ММИД изменение СКО шума в тех же пределах приводит к увеличению СКО ошибки определения дальности от 0,025 м до 0,79 м.

В ходе работы были произведены моделирование и оценка влияния джиттера импульсов стробирования фотоприемника и подсвета на точность ММИД. Результаты моделирования показали, что при увеличении величины джиттера увеличивается СКО ошибки линейности кривой развертки по дальности. При увеличении значения джиттера в пределах от 0 до 1 нс СКО ошибки линейности функции развертки по дальности увеличивается от 0,0022 до 0,083 м.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

#### Литература

1. Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M., Chaldina E. Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020, March. – Vol. 1488. – P. 012032.
2. Chua S.Y., Guo N., Tan C.S., Chew K.W., Chang S.J., Wang X. System setup consideration for range gated imaging // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific*. – Rim, 2017, July. – P. 2061.
3. Gorobets V.A., Kabashnikov V.P., Kuntsevich B.F., Metelskaya N.S., Shabrov D.V. Visibility Zone of Active-Pulse Vision Systems When Observing Along Inclined Paths // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 83(1). – P. 93–99.
4. Gruber T., Julca-Aguilar F., Bijelic M., Heide F. Gated2depth: Real-time dense lidar from gated images // *Proceedings of the IEEE? International Conference on Computer Vision*. – 2019. – P. 1506–1516.
5. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, Е.В. Зайцева и др. // *Транспортные системы и технологии*. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 68–83.
6. Xinwei W. Echo Broadening Effect in Range-Gated Active Imaging Technique / W. Xinwei, Z. Yan, F. Songtao // *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*. – 2009. – P. 1–4.
7. Chaldina E. et al. Software tool for modelling active vision areas of tomographic systems // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1862, № 1. – P. 012015.
8. Конюхов А.Л. Критерии оценки отношения сигнал / шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах / А.Л. Конюхов, А.Г. Костевич, М.И. Курячий // *Доклады ТУСУР*. – 2012. – № 2(26), ч. 1. – С. 111–115.
9. Кирпиченко Ю.Р. Исследование влияния режимов питания ЭОП на динамический диапазон активно-импульсной телевизионной системы // *Доклады ТУСУР*. – 2012. – № 2(26), ч. 1. – С. 100–104.
10. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с.
11. Агеева Н.Н. Математический алгоритм устранения джиттера при измерении с помощью электронно-оптических камер усредненной хронограммы пикосекундного импульса света / Н.Н. Агеева, И.Л. Броневова, Д.Н. Забегаев, А.Н. Кривоносов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2018. – № 11. – С. 12–14.
12. Королев А.С. Влияние джиттера на работу современных высокоскоростных цифровых устройств обработки сигналов // *Вестник Новгород. гос. ун-та им. Ярослава Мудрого*. – 2015. – № 8 (91).

**Чалдина Елизавета Сергеевна**  
Инженер каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: chaldinaliza97@tu.tusur.ru

**Мовчан Андрей Кириллович**  
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-0020-6354  
Эл. почта: mr.movchann@mail.ru

**Капустин Вячеслав Валериевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
ORCID: 0000-0002-2293-0511  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

**Бородинa Наталья Александровна**  
Инженер каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: nataska12-14@mail.ru

**В.С. Чебанов**

## Параллельные вычисления с использованием CUDA-технологий

Приведены описание параллельных вычислений, различие CPU и GPU, архитектура и иерархия CUDA. Использование CUDA в различных предметных областях. Цель работы заключается в рассмотрении принципиальных преимуществ технологии CUDA и её использования.

**Ключевые слова:** параллельные вычисления, иерархия CUDA, архитектура CUDA, CPU, GPU, GPGPU, Kernel, grid, block, thread, NVIDIA JETSON.

Параллельные вычисления – это вычисления, отличительным признаком которых является разделение процесса по потокам, обработка которых происходит параллельно и в процессе обработки они взаимодействуют между собой. Полезность использования параллельных вычислений заключается в том, что они дают возможность сократить время на выполнение задач. Для достижения наиболее показательной эффективности параллельных вычислений необходима корректная координация при проектировании, а именно правильное взаимодействие частных вычислений.

CUDA (Compute Unified Device Architecture) – это технология многопоточковых компьютерных вычислений, созданная компанией NVIDIA [1]. Используя распараллеливание на большом количестве вычислительных ядер, данная технология позволяет повысить показатели производительности и уменьшить время выполнения поставленной задачи.

В данный момент технология CUDA используется в самых разных областях, например, в обработке аудио- и видеофрагментов, проектировании объектов и изделий, медицинских исследованиях, в физическом моделировании, в беспилотных автономных мобильных роботах и т.п.

После выхода чипа от компании NVIDIA восьмого поколения, а именно G80, технология CUDA появилась в каждой видеокарте в таких семействах, как GeForce, Nvidia Tesla, Quadro, которые являются наиболее популярными.

Активным использованием технологии CUDA является рост использования процессоров Tesla (которая содержит технологию CUDA). Более семиста GPU кластеров используются в энергетическом секторе таких компаний, как Schlumberger, Chevron, а также в секторе банковских услуг в таких компаниях, как BNP, Paribas [2].

### Принципиальное различие GPU и CPU

В первую очередь, стоит отметить, что CPU и GPU различаются по своей архитектуре. Связано это с тем, что графические процессоры изначально были использованы исключительно для графических расчетов, которые давали возможность независимо производить параллельную обработку массива данных, а впоследствии это и отразилось на том, что GPU предназначен как раз для параллельных вычислений. Его архитектура способствует тому, чтобы выполнять большое количество (рис. 1) элементарных процессов, которые выполняются параллельно [3].

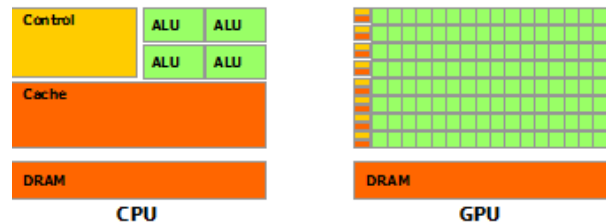


Рис. 1. Архитектура CPU и GPU

Изображение на рис. 1 отражает основное различие GPU и CPU, а именно то, что в структуре GPU содержится множество АЛУ (арифметически-логические устройства), которые сформированы в множество групп, а также обладают общей памятью. Однако структура с группировкой АЛУ и наличием общей памяти хоть и повышает продуктивность, но также усложняет программирование [4].

Учитывая архитектуру GPU и его возможности, можно считать, что GPU – это такие устройства, которые могут реализовать вычислительную модель, где вычисление потоковое. Это является реализуемым (stream computing model), когда есть входные, а также выходные данные, однако отличительным является то, что данные обрабатываются независимо, а также состоят из идентичных элементов. Входные и выходные данные обрабатываются ядром (Kernel). Отличительной особенностью такой модели является понятие потока (stream) как последовательности данных единого типа (рис. 2) [5].

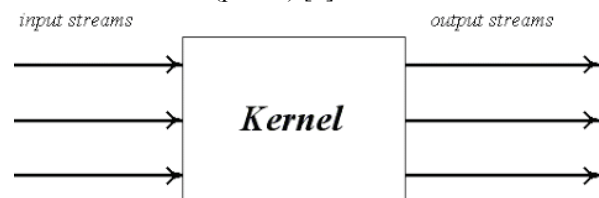


Рис. 2. Обработка потоков ядром

На базе процессора GPU существует множество разнообразных узконаправленных инструментов. Исключительным вариантом является технология GPGPU.

GPGPU (англ. General-purpose computing on graphics processing units) – технология, особенностью которой является использование непосредственно графического процессора для достижения целей, которые обычно выполняет центральный процессор. CUDA является доработанным и улучшенным вариантом GPGPU. GPGPU использует особенный язык,

что позволяет программистам составлять такие алгоритмы, которые с помощью графических процессоров решают нестандартные задачи. Использование технологии CUDA приводит к ускорению процессов обработки. Таким образом, возможно сокращение времени ожидания, например конвертации видео, даже не используя основной процессор, до 20 раз [6].

**Практическое сравнение GPU и CPU**

В работе [7] проведено сравнение эффективности GPU относительно CPU с помощью оценки времени обучения нейронной сети при использовании как графического ускорителя, так и центрального процессора. Центральный процессор – Intel Core 2 Quad Q9400 2,6 ГГц, 6 МБ L2. Графический ускоритель NVIDIA GeForce 9600 GT, 64 CUDA – ядра, 512 МБ GDDR3.

При расчете на центральном процессоре не были использованы его возможности в параллельных вычислениях. Нейронные сети соответствовали матрице Гессе размером 630 на 630 элементов [7].

График на рис. 3 дает наглядное представление соотношения времени обучения нейронной сети на центральном процессоре и графическом ускорителе.

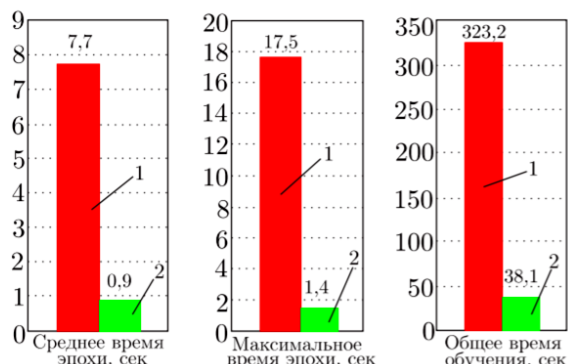


Рис. 3. Соотношение времени обучения: 1 – CPU; 2 – GPU

Согласно приведенным данным на рис. 3, использование графических ускорителей позволяет сократить время одной эпохи обучения до 9 раз, а общее время, затраченное на обучение, – до 8,5 раза [7].

**Иерархия CUDA**

Из-за того, что CUDA использует огромное число потоков, где каждый один поток соответствует одному элементу, то существует определенное построение. Иерархия состоит из трех частей, которые объединяют все потоки. Уровень, соответствующий ядру и объединяющий все потоки данного ядра, является верхним и называется grid. Также данный уровень представляет собой одномерный или же двумерный массив блоков. Блоки, составляющие массивы, являются следующим уровнем, который называется block. Каждый блок, содержащийся в массиве, также является массивом, который может быть одномерным, двумерным или же трехмерным, который состоит из потоков (threads), данные потоки составляют третий уровень. Таким образом, иерархия выглядит, как grid/block/thread (рис. 4) [8].

Реализация параллельно каждого из базовых методов является выгодной, но при этом наибольшую

эффективность архитектуры CUDA позволяет достичь метод, при котором большое количество потоков выполняет малую группу идентичных команд для собственных массивов данных [9].

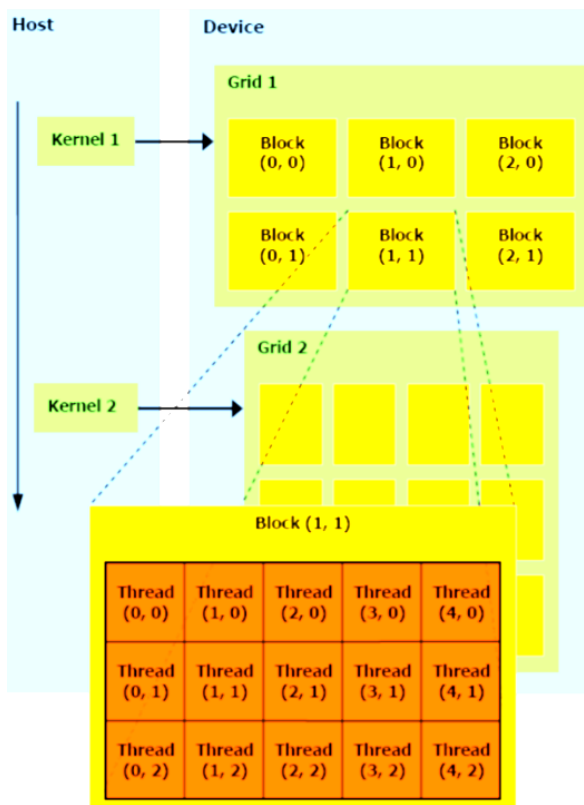


Рис. 4. Иерархия потоков CUDA

**NVIDIA Jetson**

Использование, изучение и улучшение искусственного интеллекта является все более часто встречаемой задачей. С помощью искусственного интеллекта обрабатываются данные, работают многие алгоритмы таких популярных социальных сетей, как Facebook, Instagram и т.п. Искусственный интеллект на данных площадках используется для быстрой модерации контента социальной сети. Однако необходимо понимать, что для решения такой задачи используются алгоритмы машинного обучения. В связи с необходимостью развития алгоритмов машинного обучения появилась и необходимость технической поддержки.

В связи с этим компания NVIDIA динамично развивается в данной сфере и выпускает устройства, использующиеся в реализации алгоритмов, анализе информации на основе различного самообучения для повседневных применений.

На начальном этапе компанией NVIDIA выпускались видеокарты для игр, что и принесло ей текущую популярность, однако компания быстро осознала тот потенциал, что несет в себе использование графических процессоров для решения однотипных задач, которые исполняются в параллельных потоках [10].

Понимая весь спектр заинтересованности специалистов и потенциал развития сферы, компанией NVIDIA было принято решение создания семейства

NVIDIA Jetson. Первыми представителями на рынке стали компактные Jetson TX1/TX2, а в дальнейшем появились более мощные Jetson AGX Xavier, которые были созданы для интеллектуальных автономных устройств. Позже было выпущено Jetson Nano, что завоевало пользователей своими важными отличительными качествами, а именно небольшой стоимостью и компактностью (рис. 5) [11].



Рис. 5. Jetson Nano

Jetson Nano является одноплатным компьютером, который предназначен для вычислений в области искусственного интеллекта. При сравнительно небольших размерах он использует поддерживаемые библиотеки CUDA-X AI. Потребляя всего 5 Вт, реализуется производительность в 472 гигафлопса. Стоит также отметить возможность обработки параллельно информации с множества датчиков, а также запуска одновременно нескольких нейросетей, данная возможность появилась благодаря поддержке сенсоров высокого разрешения. Он также поддерживает множество популярных фреймворков искусственного интеллекта, что позволяет разработчикам интегрировать свои фаворитные модели и фреймворки [12].

Преимущество всех Jetson состоит в том, что данные устройства могут использовать те же библиотеки CUDA для ускорения, которые уже отлажены. Таким образом, используя уже готовое приложение обучения нейронной сети на языке программирования Python, его доработанная версия позволяет использовать его на Jetson, что позволяет на выходе получать большую производительность при небольшом размере устройства [11].

#### Использование CUDA

Для более явной демонстрации эффективности технологии CUDA было рассмотрено его использование в моделировании. Так, вследствие аварии на атомной станции «Фукусима» происходили сильные выбросы радиации в океан, что было необходимо исключить. В данной ситуации было принято решение оградить здания турбин ледяной стеной. Портал Frost3d.ru провел исследование, в ходе которого для моделирования были использованы центральный процессор Intel Core i7 3770 – 3,4 ГГц и графический

процессор Nvidia Tesla K20c (с использованием технологии CUDA).

Время, затраченное программой Frost 3D на расчет этой модели на персональном компьютере с центральным процессором Intel Core i7 3770 – 3,4 ГГц и объемом оперативной памяти 16 ГБ, составило три часа. Время расчета этой же модели в программе Frost 3D на графическом процессоре Nvidia Tesla K20c составило менее 6 мин [13].

Таким образом, можно наглядно увидеть эффективность использования GPU с технологией CUDA в отличие от CPU.

Одной из возможных задач моделирования является расплавление частиц руды, например железной. Такие задачи эффективнее решаются посредством параллельного вычисления, также решается задача расчета скорости плавки одного слоя.

В таблице представлено время выполнения задачи на CPU и GPU в зависимости от количества слоев, выделяемых в частицах [14].

Время выполнения задачи на CPU и GPU

Количество слоев	Время выполнения на CPU (1 ядро 3,6 ГГц), с	Время выполнения на GPU (GeForce 560 Ti, 384 ядра), с	Выигрыш в производительности CPU / GPU
10 000	0,00528	0,000462	11,4
100 000	0,0545	0,00129	42,2
1 000 000	0,557	0,00962	57,9
10 000 000	5,778	0,0972	59,4
100 000 000	–	0,782	

Результаты эксперимента, показанные в таблице, позволяют сделать вывод, что повышение производительности графического процессора изменяется с 11,4 до 59,4 раза. Значительное увеличение эффективности заметно при повышении использованных слоев, таким образом, повышение сказывается на том, что графический процессор за секунду, по сравнению с центральным процессором, показывает большую эффективность [14].

Таким образом, использование технологии компании NVIDIA CUDA дает возможность повысить эффективность, например, алгоритма, использованного для параллельного расплавления частиц, где есть вариации сложности от  $N$  до 11 при ста тысячах слоев, или до 60 раз при ста миллионах слоев.

Технология CUDA может быть использована, исключительно применяя следующие компоненты: графический ускоритель NVIDIA с наличием технологии CUDA, компилятор языка технологии CUDA и среда разработки. Важную роль играет качественное знание языка CUDA C, чтобы правильно организовать работу алгоритмов для повышения эффективности вычислений. Важным является понимание поставленной задачи, чтобы была возможность решить её параллельно [14].

#### Литература

1. О технологии многопоточных вычислений CUDA в видеокартах компании Nvidia [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: свободный <https://www.cryptoprofi.info/?p=5921> (дата обращения: 07.09.2021).

2. Программно-аппаратная архитектура CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://www.lektorium.tv/node/36898> (дата обращения: 02.09.2021).

3. CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://ru.bmstu.wiki/CUDA> (дата обращения: 10.09.2021).

4. Знакомство с программно-аппаратной архитектурой CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://proglib.io/p/cuda> (дата обращения: 03.09.2021).

5. Основы CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <http://www.steps3d.narod.ru/tutorials/cuda-tutorial.html> (дата обращения: 05.09.2021).

6. Что такое CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://www.reg.ru/support/vps-servery/oblachnie-serveri-vps/ustanovka-programmnogo-obespechenija/cto-takoe-cuda> (дата обращения: 11.09.2021).

7. Ферцев А.А. Ускорение обучения нейронной сети для распознавания изображений с помощью технологии NVIDIA CUDA // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. – Сер.: Физ.-мат. науки. – 2012. – Вып. 1(26). – С. 183–191.

8. Вычислительная модель GPU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://lektsia.com/11x3a5.html> (дата обращения: 05.09.2021).

9. Программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений CUDA [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: свободный <https://studentopedia.ru/informatika/programmno-apparatnaya-arhitektura-parallelnih-vichislenij-cuda--parallelnie-vichisleniya-s-cuda-.html> (дата обращения: 02.09.2021).

10. Автономные устройства на базе NVIDIA Jetson [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://evo.net.ua/avtonomnye-ustroystva-na-baze-nvidia-jetson/> (дата обращения: 02.09.2021).

11. NVIDIA Jetson – ИИ-платформа для автономных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://controlengrussia.com/vstraivaemy-e-sistemy/nvidia-jetson/> (дата обращения: 10.09.2021).

12. Jetson Nano: одноплатник для машинного обучения от Nvidia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <https://habr.com/ru/post/444442/> (дата обращения: 06.09.2021).

13. Фукусима, замораживание грунта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный <http://frost3d.ru/fukusima-zamorazhivanie-grunta/> (дата обращения: 02.09.2021).

14. Сеченов П.А., Оленников А.А. Применение технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA в задаче расплавления шарообразной частицы // Кибернетика и программирование. – 2018. – № 5. – С. 8–14.

---

**Чебанов Виктор Сергеевич**

Студент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: [victorchebanov1@gmail.com](mailto:victorchebanov1@gmail.com)

А.С. Толмачева, А.В. Каменский

## Разработка двумерно-сепарабельного двухкаскадного пирамидального фильтра повышения четкости изображений

Рассмотрен рекурсивно-сепарабельный алгоритм повышения четкости изображений, а именно вариант построения двумерного фильтра в апертуре  $7 \times 7$  элементов. Описан алгоритм построения фильтра, произведено проектирование структурной схемы, определена системная функция и проведена оценка быстродействия.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, двумерные фильтры, алгоритм, быстродействие.

В настоящее время человечество все больше переходит к цифровым технологиям. В том числе речь идет о цифровых видео, фотографиях и отдельных изображениях [1]. Цифровое изображение может быть подвержено различным искажениям. Помехи и шумы являются одной из важнейших проблем в современной науке и технике. Для того чтобы убрать или максимально уменьшить искажения на цифровых изображениях, применяется цифровая обработка.

Для решения поставленных задач в данной области применяются различные методы и алгоритмы. В цифровой обработке изображений важным фактором являются эффективность используемых алгоритмов и их быстродействие. Так что в настоящее время вопрос о исследовании и разработке быстродействующих алгоритмов и методов цифровой обработки изображений чрезвычайно актуален [2].

Для реализации фильтра в рекурсивно-сепарабельном исполнении требуются рециркуляторы, т.е. первичные образующие рекурсивные ячейки. На рис. 1 представлен рециркулятор по  $n_1$ -строке, т.е. строчный рециркулятор (СР). На рис. 2 представлен рециркулятор по  $n_2$ -кадру, т.е. кадровый рециркулятор (КР). Данные рециркуляторы реализуют соответствующие ортогональные направления обработки «скользящее среднее» [3].

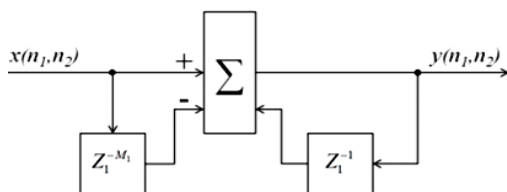


Рис. 1. Изображение строчного рециркулятора

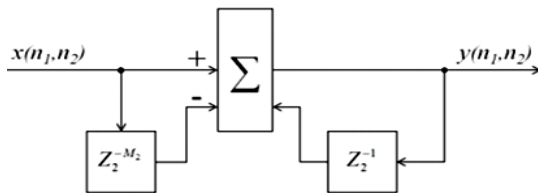


Рис. 2. Изображение кадрового рециркулятора

Разностные уравнения для строчного и кадрового рециркулятора имеют вид [4]

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1 - M_1, n_2) + y(n_1 - 1, n_2), \quad (1)$$

$$y(n_1, n_2) = x(n_1, n_2) - x(n_1, n_2 - M_2) + y(n_1, n_2 - 1). \quad (2)$$

### Описание алгоритма построения фильтра

Алгоритм формирования необходимой маски начинается со свертки исходного изображения [5]. На вход подается изображение, описываемое единицей, необходимое для демонстрации маски разработанного фильтра. Затем оно подвергается процессу свертки два раза со строчным рециркулятором, имеющим вид  $[1 \ 1 \ 1]$ , и два раза с кадровым, имеющим вид  $[1; 1; 1; 1]$ . После чего подается на сумматор с противоположным знаком. В результате свертки формируется маска размером  $7 \times 7$  элементов, она является основой для итоговой маски и подвергается дальнейшим изменениям. Полученная маска представлена на рис. 3.

-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-2	-4	-6	-8	-6	-4	-2
-3	-6	-9	-12	-9	-6	-3
-4	-8	-12	-16	-12	-8	-4
-3	-6	-9	-12	-9	-6	-3
-2	-4	-6	-8	-6	-4	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1

Рис. 3. Фильтр  $7 \times 7$  на первом этапе построения

Для корректной работы фильтра необходимо, чтобы сумма центральной и внешней областей масок была равна нулю. С целью достижения суммы, равной нулю, требуется добавить к готовой маске дополнительные маски. В данной маске центр имеет размерность  $3 \times 3$ , следовательно, для начала нужно применить маску к центру так, чтобы сохранить пропорции коэффициентов и добиться такой их суммы, чтобы вместе с суммой внешних коэффициентов они давали ноль.

Для этого производится свертка изображения 1 с коэффициентом 16 рециркулятором размерности  $M = 2$  два раза по строке и два раза по столбцу с положительным знаком, чтобы при суммировании с маской  $7 \times 7$  получить середину  $3 \times 3$  с противоположным знаком его внешней области, т.е. положительную. В итоге получается подходящая маска  $7 \times 7$ , где суммы коэффициентов центральной и внешней областей равняются нулю. Полученная маска представлена на рис. 4. Маска  $3 \times 3$  представлена на рис. 5.

-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-2	-4	-6	-8	-6	-4	-2
-3	-6	7	20	7	-6	-3
-4	-8	20	48	20	-8	-4
-3	-6	7	20	7	-6	-3
-2	-4	-6	-8	-6	-4	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1

Рис. 4. Маска фильтра 7×7 элементов

7	20	7
20	48	20
7	20	7

Рис. 5. Маска положительной части апертур фильтра

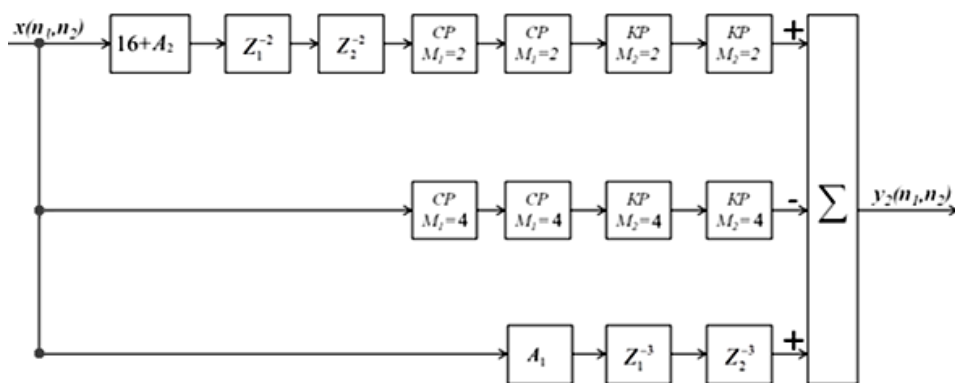


Рис. 6. Структурная схема рекурсивно-сепарабельного двумерного пирамидального фильтра

Для дальнейшей работы необходимо обозначить ряд данных. Для начала  $x(n_1, n_2)$  – это входное обрабатываемое изображение, коэффициент  $A_1$  предназначен для центрального элемента матрицы на необходимое значение, а  $A_2$  предназначен для подъема всей положительной части апертур фильтра.

На рис. 7 представлен трехмерный вид апертур разработанного фильтра.

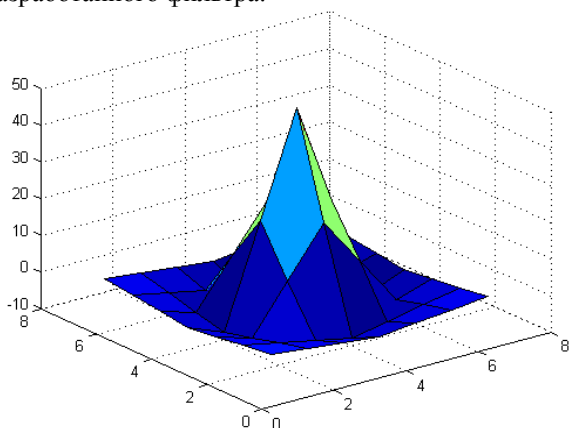


Рис. 7. Трехмерный вид апертур разработанного фильтра

**Определение системной функции фильтра**

Определение системной функции основывается на анализе структурной схемы. Функция имеет три

**Проектирование структурной схемы фильтра**

Структурная схема для рекурсивно-сепарабельного двумерного пирамидального фильтра, представлена на рис. 6. Она состоит из входного сигнала  $x(n_1, n_2)$ , который разделяется на три ветви. В первой ветви представлена свертка с двумя строчными и кадровыми рециркуляторами, коэффициентом 16, к которому прибавлен оптимальный коэффициент  $A_1$ , предназначенный для подъема центральной маски, а также элементы задержки. На второй ветви представлена непосредственно свертка двух строчных и двух кадровых рециркуляторов. На третьей ветви представлен коэффициент  $A_2$ , который является оптимальным коэффициентом для увеличения центрального элемента матрицы и задержки. Ветви с определенным знаком поступают на сумматор, и в результате получается выходной сигнал  $y_2(n_1, n_2)$ .

слагаемых в соответствии с количеством ветвей структурной схемы. Системная функция полученного фильтра имеет вид

$$H_2(z_1, z_2) = -\frac{(1-z_1^{-4})(1-z_1^{-4})(1-z_2^{-4})(1-z_2^{-4})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + 16z_1^{-1}z_2^{-1} \frac{(1-z_1^{-2})(1-z_1^{-2})(1-z_2^{-2})(1-z_2^{-2})}{(1-z_1^{-1})(1-z_1^{-1})(1-z_2^{-1})(1-z_2^{-1})} + z_1^{-2}z_2^{-2}$$

**Оценка быстродействия разработанного фильтра**

Производится эксперимент, по результатам которого было оценено быстродействие разработанного фильтра. Для проведения эксперимента выбрано изображение размера 640×480 и формата .tif. В ходе эксперимента было проведено сравнение между классической двумерной сверткой (КДС) и двухкаскадной двумерной сверткой (ДДС).

Обработано изображение размером 640×480 в формате .tif, и полученные результаты по оценке быстродействия представлены в таблице.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при использовании алгоритма, разработанного в среде программирования MATLAB, фильтр ДДС, по сравнению с КДС, показывает выиг-



рыш в быстроедействие в 9,95 раза. При использовании скомпилированных функций в С-коде фильтр ДДС, по сравнению с КДС, показал выигрыш в 2,31 раза.

#### Результаты эксперимента для изображения 640×480

№	Время обработки, с			
	Функция в MATLAB		Компилированная MEX-функция	
	КДС	ДДС	КДС	ДДС
1	6,0372	0,6877	0,8790	0,3737
2	6,7733	0,6870	0,8535	0,3782
3	6,6721	0,6571	0,8584	0,3651
4	6,6878	0,6578	0,8515	0,3707
5	6,7349	0,6547	0,8650	0,3689
6	6,7086	0,6544	0,8531	0,3710
7	6,6752	0,6676	0,8523	0,3742
8	6,6905	0,6746	0,8509	0,3688
9	6,5741	0,6713	0,8543	0,3682
10	6,6597	0,6632	0,8533	0,3677
Σ/10	6,62134	0,6654	0,85713	0,37065

#### Заключение

В качестве результатов практической части работы был разработан двумерный фильтр повышения четкости изображения, а именно двумерный рекурсивно-сепарабельный двухкаскадный пирамидальный фильтр, описаны алгоритмы его построения, спроектирована структурная схема данного фильтра и определена его системная функция.

Итоговый алгоритм представляет собой формирование маски  $7 \times 7$  с положительной апертурой  $3 \times 3$ . В фильтре присутствуют коэффициенты, которые играют роль корректора значений элементов маски. Так, первый коэффициент производит подъем центрального элемента на некоторое значение, а второй коэффициент аналогичное действие производит с центральной частью. Это служит для корректировки обработки изображения в зависимости от требова-

ний. Из полученных результатов видно, что при использовании разработанного алгоритма в среде программирования MATLAB фильтр двухкаскадной двумерной свертки показал выигрыш в быстроедействие: для изображения с размерами  $640 \times 480$  – в 9,95 раза, а при использовании скомпилированных функций в С – в 2,31 раз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

#### Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вуде. – М: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Обработка изображений: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 2: Цифровая обработка изображений / Б.Н. Грудин, В.С. Плотников, С.В. Полищук. – Изд. дом Дальневосточного федер. ун-та, 2013 – 115 с.
3. Каменский А.В. Рекурсивно-сепарабельные двумерные цифровые фильтры обработки телевизионных изображений / А.В. Каменский, М.И. Курачий // Известия Юго-Западного гос. ун-та. – Сер.: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – Курск, 2018. – Т. 8, № 4 (29). – С. 25–33.
4. Каменский А.В. Рекурсивно-сепарабельные методы и алгоритмы повышения качества изображений в телевизионных измерительных системах дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2019. – 161 с.
5. Захаренко Е.И., Альтман Е.А., Васеева Т.В. Применение метода разложения двумерной свертки при реализации цифровых фильтров // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 4 (69). – С. 95–104. doi: 10.17212/1814-1196-2017-4-95-104

#### Толмачева Александра Сергеевна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: 89131003680@mail.ru

#### Каменский Андрей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: andru170@mail.ru

УДК 004.932.4

А.А. Тисленко, А.В. Каменский

## Алгоритм исправления радиальной дисторсии посредством усреднения корректирующего коэффициента

Рассматривается решение вопроса устранения дисторсионных искажений радиального типа. Составлен алгоритм исправления радиальной дисторсии посредством усреднения параметра, отражающего влияние дисторсионных искажений. Проведён эксперимент по исправлению дисторсионных искажений с помощью данного алгоритма.

**Ключевые слова:** цифровая обработка, дисторсионные искажения, aberrации, разрешение, поле изображения.

Необходимость получения качественных изображений с высоким разрешением приводит к повышению требований к объективам камеры. Тем не менее изображения, полученные через объектив камеры, имеют координатные искажения. Большую часть из них можно исправить калибровкой, меньшую – цифровой обработкой.

Координатные искажения (aberrации) подразделяют на монохроматические и хроматические.

Монохроматические aberrации приводят к искажению проекции элемента изображения в некоторую фигуру рассеяния [1].

К монохроматическим aberrациям относятся: сферическая, aberrация кома, астигматизм, aberrация кривизны поля изображения, дисторсионные искажения.

Хроматические aberrации – физические погрешности, вносимые в изображение разницей коэффициента преломления для пучков с различными длинами волн.

Дисторсионные искажения подразделяются на тангенциальную и радиальную дисторсию.

Тангенциальная дисторсия возникает вследствие отклонения нормали к плоскости изображения от главной оптической оси камеры, как следствие, возникает смещение главной оптической оси относительно центра кадра.

Пример изображения, которое подвержено тангенциальной дисторсии, представлен на рис. 1.

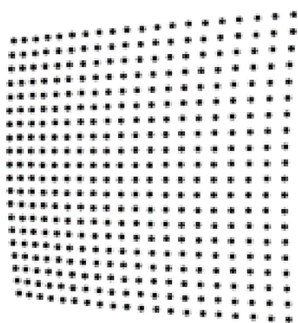


Рис. 1. Изображение, которое подвержено тангенциальной дисторсии

Основным методом исправления тангенциальной дисторсии является калибровка камеры.

Радиальная дисторсия характерна для изображений, полученных с помощью широкоугольных объективов.

Природа возникновения радиального типа дисторсии лежит в конструкции линз объектива, конкретно – в их сферической форме. На практике это выражается в значительном искривлении прямых линий по краям изображения, ближе к центру изображения степень искривления уменьшается [2].

В связи с этим радиальная дисторсия подразделяется на «подушкообразную» и бочкообразную. Для бочкообразной дисторсии характерно выгибание линий наружу, при этом изображение становится выпуклым, а для подушкообразной – изгиб линий, который направляется ближе к центру кадра, линии при этом вогнуты.

Кроме того, подушкообразную дисторсию иногда ещё называют отрицательной, и она является характерной для широкого угла. А бочкообразная, или положительная дисторсия, чаще всего может проявляться на больших фокусных расстояниях.

Менее часто встречается комплексная дисторсия, которая объединяет проявление подушкообразной и бочкообразной дисторсии. Для изображений с такой разновидностью искажений характерны выгибание прямых линий ближе к центру изображения, а ближе к краям – «вогнутость».

Степень проявления данного вида искажений зависит от фокусного расстояния: при увеличении фокусного расстояния к максимально возможной, для текущего объектива величины становится менее заметной.

Однако основным методом исправления дисторсионных искажений является калибровка камеры, а также цифровая обработка полученного изображения [3].

Исходя из вышесказанного, можно представить математическое описание радиальной дисторсии. На рис. 2 представлена общая схема образования сферических искажений, в том числе радиальной дисторсии.

Математическая модель [4] возникновения сферических искажений представлена в виде:

$$\rho_1 = R \sin(\arctg \frac{\rho}{R}) = \frac{R\rho}{\sqrt{R^2 + \rho^2}}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус сферы;  $\rho$  – расстояние от центра отверстия планшайбы до края объекта;  $\varphi = \arctg(\frac{\rho}{R})$  – угол между нормалью и направлением на объект.

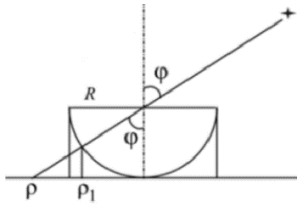


Рис. 2. Схема образования сферических искажений

Так как выражение (1) описывает образование радиальной дисторсии на изображении, то обратное выражение, очевидно, описывает характер коррекции радиальной дисторсии. Иначе говоря, выражение (2) позволяет дисторсию отрицательного или положительного типа преобразовать к «нулевой» дисторсии, т.е. отсутствию данного искажения.

$$\rho = R \operatorname{tg}(\arcsin \frac{\rho_1}{R}) = \frac{R \rho_1}{\sqrt{R^2 + \rho_1^2}}. \quad (2)$$

Для исправления дисторсии, исходя из выражения (2), необходимо подобрать лишь параметр  $R$ , т.е. радиус сферы. Как правило, современные цифровые пакеты, предназначенные для цифровой обработки изображений, предоставляют выбор значения параметра непосредственно пользователю.

В данной работе предлагается автономный подбор параметра, на который влияет лишь размер изображения.

После исправления дисторсионных искажений наблюдается снижение разрешения по полю изображения, а именно по его краям [5].

#### Алгоритм исправления радиальной дисторсии

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма исправления дисторсионных искажений.

Для исправления искажений в данной работе предполагается измерение разрешения изображения посредством вычисления телевизионных линий (ТВЛ) в отдельных фрагментах, в частности на углах изображения, где влияние дисторсии наибольшее, исходного изображения и для ряда изображений, подверженных исправлению дисторсии при различных значениях параметра  $R$  (коэффициента коррекции).

Алгоритм, изображённый на рис. 4, состоит из следующих блоков:

1. Загрузка изображения.
2. Усреднение уровня контраста по всему изображению.

3. Выбор 5 областей для оценки разрешения, первой выбирается центральная область, остальные – по углам изображения.

4. Вычисление разрешения выбранных областей изображения.

5. Поиск среди вычисленных разрешений областей по углам изображения области с наиболее высоким разрешением.

6. Применение функции, исправляющей дисторсию, для диапазона от 0 до 100 коэффициента коррекции с шагом 10 (применение такого диапазона обусловлено тем, что значениям более 100 соответствуют сильные искажения, что не характерно для большинства объективов).

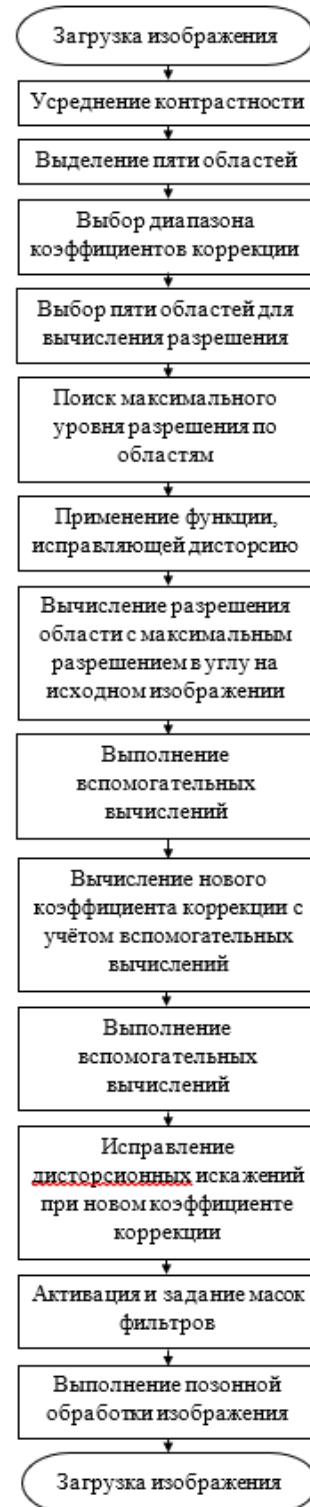


Рис. 3. Блок-схема алгоритма исправления дисторсионных искажений

7. Вычисление разрешений области изображений, ранее определённой как область по углам изображения с максимальным уровнем разрешения.

8. Вычисление разностей между исходным разрешением данной области и вычисленным разрешением данной области после применения корректирующей функции при различных значениях коэффициента коррекции.

9. Вычисление частных от деления разностей, рассчитанных в предыдущем пункте, на соответствующие значения коэффициента коррекции.

10. Вычисление среднего от суммы частных, рассчитанных в предыдущем пункте.

11. Вычисление среднего значения коэффициента коррекции.

12. Определение разности разрешений для вычисленного среднего коэффициента коррекции.

13. Определение нового коэффициента коррекции путём вычисления частного от разности разрешений при среднем коэффициенте коррекции на среднее от суммы частных.

14. Применение нового коэффициента коррекции для исправления дисторсии на исходном изображении.

15. Вывод изображения после исправления дисторсии.

Усреднение уровня контраста по всему изображению достигается путём расчёта среднего уровня контрастности и применения его к значениям уровня контраста пикселей.

**Результаты эксперимента**

На рис. 4 представлены изображения (размером 1280×1024) до исправления дисторсии (а) и схема обозначений зон для измерения разрешения. На основе этого изображения при помощи алгоритма, описанного выше, был проведён эксперимент по исправлению дисторсии.

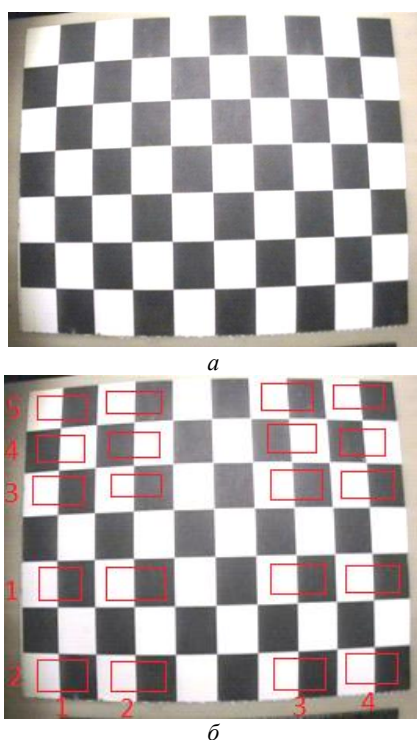


Рис. 4. Исходные изображения: до исправления дисторсии (а); схема обозначений фрагментов изображения (б)

На рис. 4, б фрагменты разделены наподобие сетки: вертикально располагаются области измерения, горизонтально – номер измерения (серия).

На рис. 5 представлен график распределения разрешения по полю изображения в данных фрагментах исходного изображения.

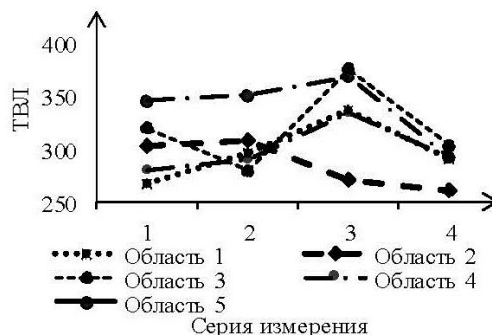


Рис. 5. График распределения разрешения по полю изображения до исправления дисторсии

Из рис. 5 видно, что разрешение по полю изображения распределено неравномерно, причём характерно, что разрешение по краям изображения в целом находится на одном уровне относительно разрешения в центре.

На рис. 6 представлено изображение после исправления дисторсии при коэффициенте коррекции, равном 14.

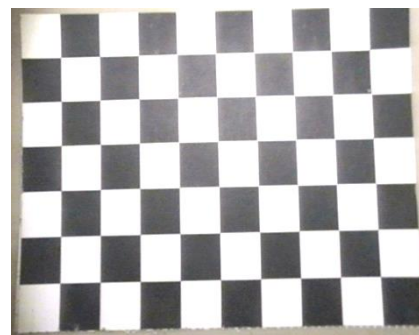


Рис. 6. Изображение после исправления дисторсии

На рис. 7 представлен график распределения разрешения по полю изображения в фрагментах изображения после исправления дисторсии.

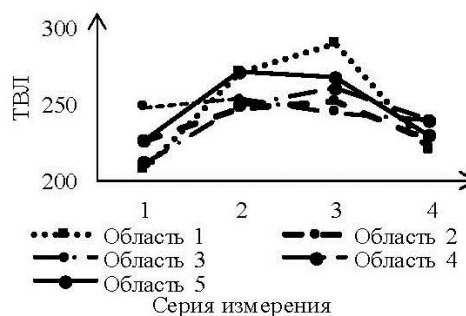


Рис. 7. График распределения разрешения по полю изображения

На рис. 6 в сравнении с рис. 4 видно, что падение уровня разрешения к краям изображения уменьшилось, что сопровождается тем, что визуально линии выглядят прямыми, что является подтверждением исправления дисторсии.

Помимо визуального показателя, график распределения разрешения показывает, что уровни разрешения по краям ниже, чем ближе к центру, что соответствует случаю графика распределения разрешения по полю изображения без дисторсионных искажений. Общий уровень разрешения значительно снизился, поскольку после преобразований изображение стало более размытым.

#### **Заключение**

Исходя из результатов эксперимента, были получены следующие результаты:

1. Алгоритм исправления дисторсии показал хороший результат работы, выпуклость линий по краям изображений уменьшилась, и визуально линии выглядят прямыми.

2. Полученный коэффициент коррекции для исправления дисторсии на исходном изображении равен 14.

Для не слишком большого влияния дисторсии (параметр  $R$  в диапазоне от 0 до 100) алгоритм работает хорошо и зависит преимущественно от размеров самого изображения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

#### *Литература*

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Грудин Б.Н. Обработка изображений: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 2: Цифровая обработка изображений / Б.Н. Грудин, В.С. Плотников, С.В. Полищук. – Изд. дом Дальневосточного фед. ун-та, 2013. – 115 с.
3. Шипунова К.В. Измерение и коррекция координатных искажений в телевизионных изображениях программными средствами / К.В. Шипунова, А.В. Каменский, М.И. Курячий // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 36–39.
4. Капустин В.В. Коррекция координатных искажений в телевизионно-вычислительных системах // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4 – С. 174–178.
5. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 352 с.

---

#### **Тисленко Алексей Александрович**

Студент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: [tislenko\\_1999-2012@mail.ru](mailto:tislenko_1999-2012@mail.ru)

#### **Каменский Андрей Викторович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: [andru170@mail.ru](mailto:andru170@mail.ru)

УДК 004.93'1

М.Е. Сукотнова, Г.Е. Эдель, В.В. Капустин

## Исследование эффективности работы алгоритмов автоматической идентификации лиц на базе методов LBPН и Eigenface

Рассмотрен принцип работы и оценена эффективность двух алгоритмов автоматической идентификации лиц – LBPН и Eigenface при изменении следующих условий: ракурс съемки, повороты головы? пространственное разрешение области лица в кадре, а также проведен анализ быстродействия работы каждого из алгоритмов. В ходе работы был выявлен наиболее предпочтительный алгоритм автоматической идентификации лиц на основе полученных результатов.

**Ключевые слова:** LBPН, Eigenface, идентификация, распознавание, лицо, эффективность, автоматическая идентификация лиц.

В настоящее время алгоритмы автоматической идентификации лиц прочно закрепились в различных областях современной жизни человека, в том числе в сфере безопасности, системах видеонаблюдения, медицине и других не менее важных сферах человеческой деятельности. Однако несмотря на быстрое развитие современных алгоритмов идентификации, они все еще не лишены определенного ряда проблем при их использовании. К таким проблемам можно отнести: несовершенство входных параметров, обусловленное изменениями погодных условий, изменением положения идентифицируемого объекта, разрешением камеры, особенностями изображений, полученных с использованием активно-импульсных телевизионных измерительных систем [1].

Также немаловажен тот факт, что при обработке входных данных алгоритмом за один раз обрабатывается большое количество пикселей, дающих информацию системе о принадлежности его к одному из выделенных классов, что, несомненно, увеличивает и время обработки, и количество потребляемой памяти [2, 3]. Все это, а также многие другие проблемы создают острую необходимость в поиске, создании и совершенствовании уже имеющихся алгоритмов автоматической идентификации лиц для обеспечения наилучших результатов как на этапе распознавания, так и на этапе идентификации. Таким образом, поиск наиболее эффективного алгоритма идентификации лиц является одной из приоритетных задач систем компьютерного зрения.

Алгоритмы автоматической идентификации лиц – это алгоритмы, которые включают в себя два логических блока. Первый блок, называемый блоком характерных признаков, отвечает за выделение алгоритмом уникальных особенностей лица человека (губы, нос, расположение глаз). Именно такого рода информация является наиболее полезной для классификатора. Второй же блок, именуемый блоком механизма классификации, отвечает за принятие решения системой о сходимости поступающего лица с имеющимся и заранее выделенным признаком [4]. Иначе говоря, алгоритмы автоматической идентификации лиц сначала выделяют необходимую для классификации информацию и делят ее на классы, а затем обрабаты-

вают эту информацию на основе поступающих в систему лиц.

Таким образом, почти все алгоритмы идентификации лиц можно описать одной схемой, представленной на рис. 1.

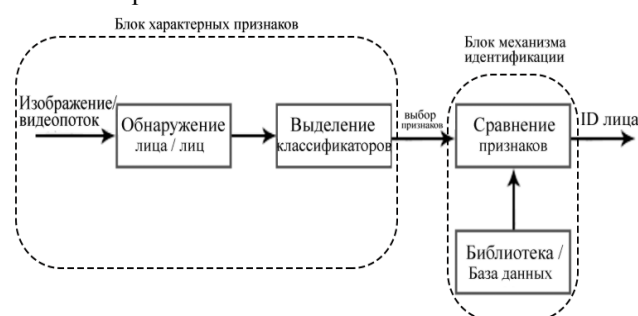


Рис. 1. Схема распознавания и идентификации лиц

На сегодняшний день существует множество различных методов и алгоритмов для распознавания и идентификации лиц, однако в рамках данной работы будут рассмотрены только два из них – метод LBPН и метод Eigenface.

### Метод LBPН

Метод LBPН (или метод локальных бинарных шаблонов) работает по принципу деления входного лица на определенное количество блоков, образующих сетку. Такие блоки хранят в себе большой массив значений, в которых содержится информация о том, сколько раз в блоках встречается тот или иной код. Основой же метода является оператор LBP, помечающий бинарной меткой (или шаблоном) каждый пиксель. Такая бинарная метка вычисляется из всех значений соседних пикселей квадрата размером  $3 \times 3$  пикселя. Причем каждому пикселю изображения ставится в соответствие свое значение в оттенках серого. Это говорит о том, что входные данные, обрабатываемые методом LBPН, должны поступать в систему в градациях серого [5].

Однако помимо основного оператора LBP используется и оператор  $LBP_{p,r}$ , где  $p$  – это число используемых шаблонов, находящихся в радиусе  $r$ , тогда как  $r$  – это окружность с определенным радиусом. Именно на число  $p$  разбивается окружность на отрезке дуги. К окружности затем применяется били-

нейная интерполяция – процесс, при котором определяется наиболее близкий к началу каждого из отрезков дуги окружности пиксель [4]. Наглядный пример оператора  $LBP_{p,r}$  представлен на рис. 2.

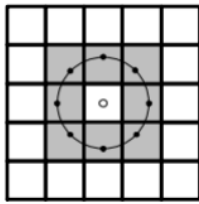


Рис. 2. Оператор  $LBP_{p,r}$

После сравнения одного пикселя с его соседними формируется гистограмма кодов. Такая гистограмма основывается на интенсивности центрального пикселя относительно соседнего: если интенсивность центрального пикселя будет больше или равна интенсивности соседнего, ему будет присвоено значение 1; если же значение интенсивности центрального пикселя будет меньше, присвоенное значение такого пикселя будет равняться 0. Порогом в таком случае является значение интенсивности центрального пикселя. Полученные в результате такой операции гистограммы кодом объединяются в одну общую, образуя готовый идентификатор. Вместе с гистограммами кодов объединяются и их бинарные векторы (бинарные дескрипторы) в один общий. Назначением такого вектора является инвариантность. Таким образом, шаблоном для центрального пикселя является как последовательность всех бинарных векторов, так и последовательность из полученных гистограмм кодов [5–8].

На практике процесс идентификации с использованием данного метода осуществляется с помощью поиска наименьшего расстояния между гистограммами кодов входного изображения и изображениями, которые являются идентификаторами. Иначе говоря, поиск соответствия между идентификатором и входным лицом осуществляется с помощью сравнения полученной гистограммы кодов входного лица и гистограммы кодов лица, являющегося идентификатором.

### Метод Eigenface

Суть рассматриваемого метода заключается в сжатии исходных данных с помощью главных компонент, а также уменьшении размерности обучающей выборки. Таким образом, изображение в системе будет представлено вектором малого размера (или главных компонент), а лица – комбинацией собственных векторов. Сжатие осуществляется за счет отбрасывания системой той части, которая отвечает за общую информацию о лице, в то время как сведения об уникальных особенностях лица остаются.

Классификатор же строится следующим образом: из обучающей выборки одного лица исключаются общие признаки посредством нахождения математического ожидания пикселей с дальнейшим приведением полученных значений к среднему значению. Для получения уникальных особенностей лица необходимо полученное изображение после приведе-

ния выборки к среднему значению вычесть из каждого, имеющегося в начальной выборке. Затем, для построения классификатора, необходимо посчитать собственные векторы для каждого изображения в обучающей выборке [6, 9].

Таким образом, процесс идентификации можно описать следующим образом: собственные векторы (главные компоненты) лиц, которые поступают в систему, сравниваются с собственными векторами (главными компонентами) обучающей выборки – лиц, имеющихся в базе данных.

### Эффективность работы рассматриваемых методов автоматической идентификации лиц

Эффективность работы рассматриваемых методов по критерию достоверности идентификации лиц оценивалась при изменении следующих условий:

- ракурс съемки;
- повороты головы;
- пространственное разрешение области лица в кадре.

Количество изображений в созданной базе данных для одного пользователя составило 500 фотографий в разных ракурсах, что обусловлено необходимостью уменьшения числа ложных срабатываний.

Пример созданной базы данных представлен на рис. 3.



Рис. 3. Пример созданной базы данных

Первое условие – ракурс съемки. В процессе исследования были выбраны следующие ракурсы съемки: съемка снизу, съемка сверху, съемка под прямым углом. На рис. 4 показан пример работы одного из алгоритмов при различных ракурсах съемки.

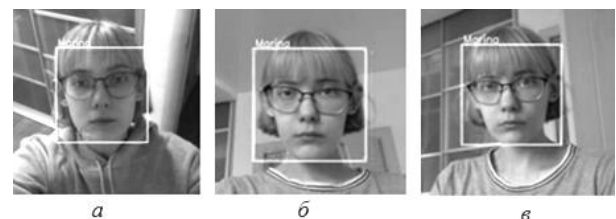


Рис. 4. Программная реализация алгоритма автоматической идентификации лиц при съемке сверху (а); снизу (б); прямой съемке (в)

Для более детального исследования были добавлены дополнительные случаи: съемка сверху и снизу со статичным положением лица. На рис. 5 представлен пример работы одного из алгоритмов при различных ракурсах съемки и статичном положении головы.

В ходе данного исследования было выявлено, что при различных ракурсах съемки системе было сложнее детектировать лицо, а значит, и идентифицировать его, что объясняется выбором детектора.



Рис. 5. Результат работы алгоритма автоматической идентификации лиц для статичного положения головы при съемке сверху (а) и снизу (б)

Результаты полученных средних значений индекса достоверности для данного условия представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Полученные средние значения индекса достоверности при различном ракурсе съемки**

Алгоритм	Индекс достоверности, %
LBPН	75–90
Eigenface	40–70

Следующее условие – повороты головы. Для данного условия были выбраны следующие повороты головы: анфас и положение три четверти для обеих сторон. В ходе данного исследования было выявлено, что различные повороты головы не влияют на результат идентификации – система правильно распознает лицо как при повороте лица вправо или влево, так и при положении лица анфас. На рис. 6 представлен пример работы одного из алгоритмов при различных поворотах головы.



Рис. 6. Программная реализация алгоритма автоматической идентификации лиц при различных поворотах головы

В табл. 2 представлены результаты полученных средних значений индекса достоверности.

Таблица 2

**Полученные средние значения индекса достоверности при различных поворотах головы**

Алгоритм	Индекс достоверности, %
LBPН	60–95
Eigenface	50–85

Последнее условие – изменение пространственного разрешения области лица в кадре. Данное условие также является важным в вопросах распознавания, поскольку в том случае, при котором лицо находится в значительном удалении от камеры, количество пикселей, приходящееся на локализованную область лица в кадре, мало, что приводит к низкой детализации области и наоборот. Таким образом, важно учитывать эффективность работы системы не только при высокой детализации кадра, но и при низкой. На рис. 7 представлен пример работы одного из алгоритмов при высокой и низкой детализации.



Рис. 7. Результат работы алгоритма автоматической идентификации лиц при высокой (а) и низкой (б) детализации

В табл. 3 представлены результаты полученных средних значений индекса достоверности для данного условия при высокой детализации области лица в кадре – 571×571 пиксель.

Таблица 3

**Полученные средние значения индекса достоверности при высокой детализации области лица**

Алгоритм	Индекс достоверности, %
LBPН	75–95
Eigenface	65–75

Результаты полученных средних значений индекса достоверности в случае низкой детализации лица (120×120 пикселей) представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Полученные средние значения индекса достоверности при низкой детализации области лица**

Алгоритм	Индекс достоверности, %
LBPН	75–95
Eigenface	60–75

**Быстродействие алгоритмов LBPН и Eigenface**

Точность работы алгоритмов автоматической идентификации лиц – самый важный параметр, по которому оценивают эффективность работы алгоритма, однако не единственный. Вторым по важности параметр – быстродействие. Важно понимать, за какое время система сможет соотнести поступившее в нее лицо к определенному классу. Быстродействие системы фиксировалось при разрешении видеокладов 640×480 и 1280×720 пикселей. Результаты полученных значений быстродействия при большом и малом разрешении видеокладов представлены в табл. 5.

По полученным данным видно, что метод Eigenface работает быстрее, чем метод LBPН, что связано с особенностями работы алгоритмов: алгоритм



Eigenface оставляет только необходимую ему для идентификации информацию, тогда как алгоритм LBPН обрабатывает каждый пиксель изображения.

Т а б л и ц а 5  
**Быстродействие алгоритмов при большом  
и малом разрешении видеокadra**

Алгоритм	Быстродействие, мс	
	640×480	1280×720
LBPН	57	85
Eigenface	16	39

### Заключение

Обращаясь к полученным значениям индекса достоверности при различных условиях, можно сделать вывод, что метод LBPН является наиболее предпочтительным в системах автоматической идентификации лиц, поскольку данный метод обеспечивает более высокие показатели точности при различных условиях съемки. Однако в обоих случаях системе было сложнее детектировать лицо при разных ракурсах съемки. Это объясняется работой каскадов Хаара, выбранных в данной работе в качестве детектора. Каскады Хаара неустойчивы по отношению к изменениям поворотов изображения, что препятствует более быстрому детектированию. Замена детектора в обоих случаях позволит системе не только быстрее распознавать поступающие в нее лица, но и выдавать более высокие значения индекса достоверности.

Стоит отметить, что алгоритм Eigenface работает быстрее, чем алгоритм LBPН. Поскольку быстродействие алгоритма зависит в том числе и от разрешения кадра, результаты его работы оценивались как при низком, так и при высоком разрешении: показатель быстродействия при низком разрешении кадра достигал 16 мс, тогда как для LBPН – 57 мс, а при высоком разрешении показатели быстродействия составили 39 мс для Eigenface и 85 мс для LBPН. Такая разность в показателях быстродействия обусловлена разным принципом работы двух алгоритмов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 27-79-10200 в ТУСУРе.

### Литература

1. Капустин В.В., Мовчан А.К., Зайцева Е.В., Курячий М.И. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспорт-

ных средств в сложных метеоусловиях // Сетевой электронный журнал «Транспортные системы и технологии». – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 068–083.

2. Трифоненко А.С. Алгоритм распознавания человеческих лиц для идентификации образа / А.С. Трифоненко, А.Г. Янишевская // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. V юбилейной общерос. науч.-техн. конф., Омск, 07–08 октября, 2014. – С. 304–306.

3. Компьютерное распознавание человеческих лиц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2000/03/177945/> (дата обращения: 07.09.2021).

4. Антончик А.В. Обзор методов распознавания лица на изображении / А.В. Антончик, А.А. Дерюшев // Доклады БГУИР. – 2009. – № 2 (40). – С. 67–72.

5. Синецкий Р.М. Система учета посещения занятий студентами на основе алгоритмов распознавания лиц / Р.М. Синецкий, М.М. Гавриков // Изв. высших учеб. завед. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (191). – С. 24–30.

6. Сукотнова М.Е. Сравнительный анализ методов распознавания и идентификации лиц с помощью библиотеки OpenCV // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: матер. докл. IX регион. науч.-практ. конф. – 2020. – № 1-2. – С. 289–292.

7. Громов В.В. Исследование особенностей алгоритмов распознавания лиц на примере компьютерного зрения / В.В. Громов, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. – 2017. – С. 240–245.

8. Фомин А.А. Исследование алгоритмов распознавания лиц на изображении / А.А. Фомин, А.А. Трифонов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2016. – № 1(34). – С. 76–85.

9. Крюков В.А. Анализ методов распознавания лиц библиотеки OpenCv // Академическая публицистика. – 2019. – № 6. – С. 54–57.

### Сукотнова Марина Евгеньевна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: msukotnova@mail.ru

### Эдель Герман Евгеньевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: german.edel99@gmail.com

### Капустин Вячеслав Валериевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

УДК 681.2.083

С.В. Смирнов, Т.О. Клишкин

## Времяпролетные камеры и области их применения

Приведено описание времяпролетной технологии, с помощью которой можно получить дополнительную ценную информацию об объекте съемки со светоотражающей поверхностью, в том числе о его форме, положении и ориентации в пространстве. В трехмерной съемке объектов особенно эффективна технология ToF, поскольку измерение осуществляется бесконтактным методом и занимает буквально доли секунды.

**Ключевые слова:** 3D-сканирование, 3D-технологии, получение объекта, цифровая модель, карта глубины, ToF-технология, времяпролетная камера.

В современном автономном производстве, в том числе в робототехнике и логистике, время от времени появляются задачи, для решения которых эффективно использовать трехмерные изображения наряду с обычными двумерными данными.

Наблюдается обширное применение 3D-сканирования во многих сферах: от медицины и археологии до метрологии и строительства. Все существующие технологии сканирования можно разделить на две обобщенные категории – сканеры ближнего и дальнего действия, но важно заметить, что любая из них не может универсально решить поставленную проблему. Для решения какой-либо задачи требуется определенная технология или их комбинация. Данная работа посвящена вопросам времяпролетного 3D-сканирования, его принципу работы и сфер применения.

### Времяпролетные камеры

Камера времени пролета (ToF-камера) – это система камер для визуализации дальности, использующая методы определения времени пролета для определения расстояния между камерой и объектом для каждой точки изображения путем измерения времени прохождения искусственного светового сигнала, формируемого лазером или светодиодом. Лазерные камеры времени пролета являются частью более широкого класса лидаров без сканирования, в которых вся сцена снимается с каждым лазерным импульсом, в отличие от точечной съемки лазерным лучом, например, в системах сканирования лидаров.

### Устройство времяпролетных камер

Времяпролетная камера работает, освещая сцену модулированным источником света и наблюдая за отраженным светом. Как правило, освещение осуществляется твердотельным лазером или светодиодом. Отраженный свет несет информацию, которая распределяется на силу света (уровень яркости) и путь которой проходит свет от объекта до сенсора, т.е. значение глубины пространства. ToF-технология в основном работает по двум различным принципам: импульсном времяпролетном принципе и принципе непрерывной волны. Различие заключается в том, как источник испускает свет, и в том, как сенсор его принимает [2].

Принцип непрерывной волны заключается в стабильной передаче энергии и затем получении сигнала от отражающих объектов информации. Основное преимущество данного принципа заключается в том,

что энергия не пульсирует, поэтому намного проще изготавливать и эксплуатировать данные камеры [2].

В импульсном методе источник света формирует короткие световые импульсы и отраженная энергия считывается параллельно в каждом пикселе. Электрические заряды, накопленные во время этих световых импульсов, измеряются и используются для вычисления расстояния [2].

### Облако точек

В датчиках ToF-дистанция измеряется для каждого пикселя в 2D-адресуемом массиве, в итоге получается карта глубины. Карта глубины представляет собой комплект 3D-точек (каждая точка называется воксель). 2D-представление карты глубины представляет собой черно-белое изображение, как показано на примере банок с газировкой (рис. 1) [3]. Чем ярче интенсивность, тем ближе воксель.



Рис. 1. Карта глубины

В качестве альтернативы карта глубины может быть отображена в трехмерном пространстве в виде набора точек или облака точек. 3D-точки могут быть математически связаны, чтобы сформировать сетку, на которую можно отобразить поверхность текстуры. Если текстура является цветным изображением того же предмета в реальном времени, появится реалистичное 3D-изображение предмета, как показано на рис. 2 [3]. Можно повернуть аватар, чтобы просмотреть разные перспективы [3].



Рис. 2. Аватар, сформированный из облака точек

### Алгоритмы обработки изображения

Рассмотрим алгоритмы обработки 3D-изображения [4].

Определение местоположения детали на снимке. Для многих алгоритмов обработки необходимы начальные координаты объекта. В видеодатчиках присутствует сразу несколько алгоритмов для решения подобных задач.

Определение расположения элемента по контуру. Определяет размещения элемента и ее угол вращения относительно обученной модели, сопоставляя образец и снимок.

Определение расположения по краям. Определяет положение по расположению одного края или двух краев под прямым углом. В данном методе задается необходимое направление поиска ближайшего края, на этих основаниях определяются положение и угол всей детали.

Расположение элемента по окружности. Определяет положение и вращение детали по найденной окружности.

Определение положения по текстовой строке. Текст может меняться, впрочем, видеодатчик всегда будет его находить. Вдобавок этот метод представляет готовое решение для контроля нанесения срока годности и даты производства на продукцию [4].

Также при обработке изображений считается большое количество информации об изображении и то, что на нем присутствует. Например, дистанция (расстояние между двумя краями или точками), окружность (диаметр, длина и т.д.), угол (измерение угла между кромками или объектами) и т.п.

### Факторы, влияющие на точность измерения карты глубины

Есть несколько факторов, которые могут повлиять на результаты измерений при использовании камер ToF, и поэтому может быть снижена точность формирования карты глубины.

*Множественное отражение.* При определении расстояния до объектов необходимо чтобы луч вернулся от объекта однократно. Изогнутая поверхность имеет углы и, как правило, отражает дополнительный свет, что приводит к существенным ошибкам [5].

*Рассеянный свет.* Возникает в результате множественного отражения света в объективе или непопадании отраженного луча в объектив камеры (рис. 3). Данный фактор сложно учесть при проектировании, и при любом измерении рассеянный свет будет влиять на точность измерения не в лучшую сторону [5].

Глянцевые предметы и поверхности, находящиеся возле камеры, необязательно, чтобы они находились в поле зрения камеры. Они отражают от себя свет, который попадает на сенсор камеры, многократно отразившись в объективе [5]. Рассеянный свет становится причиной размытости и четкости формирования изображения [5].

*Окружающий свет.* Каждый пиксель сенсора может сохранить у себя в памяти только определенный объем заряда. Регистрируя большой заряд энергии от окружающего света, остается меньше памяти

для регистрации импульсного света. Оптический полосовой фильтр фиксирует только тот световой диапазон, который излучает источник света камеры, благодаря чему искусственный свет не будет влиять на точность измерения, из-за малого сходства со спектральным диапазоном камеры [5].

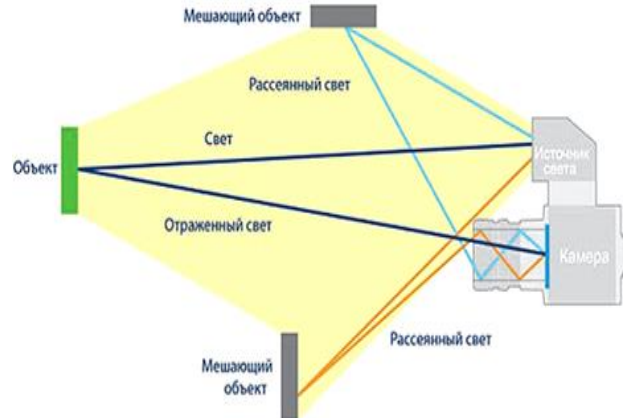


Рис. 3. Принцип работы времяпролетной камеры

Дневной свет охватывает весь диапазон спектра. Это затрудняет формирование контрастного изображения в солнечный день. И для данных условий в камерах оборудуют дополнительные защитные устройства [5].

Температура также очень сильно влияет на точность измерения. Важным фактором является время срабатывания электронного затвора. Например, если его срабатывание произойдет на 33 пс раньше или позже, то погрешность показаний может измениться на сантиметр [5].

Даже самые качественные компоненты не гарантируют точность измерений ToF-камер. Обязательно следует соблюдать условия, в которых используется оборудование.

### Области применения ToF-технологии

Технологии могут быть применены в различных областях: автомобильной, промышленной, здравоохранения, маркетинга, игр и развлечений. Датчик ToF также может служить устройством ввода как для стационарных, так и для портативных вычислительных устройств. В автомобилестроении датчики ToF могут обеспечить автономное вождение и повысить осведомленность окружающих о безопасности. В промышленном сегменте датчики ToF могут использоваться в качестве НМИ и для обеспечения защитных оболочек в автоматических ячейках, где людям и роботам может потребоваться работать в непосредственной близости. В умной рекламе, использующей датчики ToF в качестве ввода жестов и распознавания людей, цифровые вывески могут стать интерактивными, ориентируя медиаконтент на конкретную аудиторию. В здравоохранении распознавание жестов обеспечивает бесконтактное взаимодействие человека и машины, способствуя созданию более комфортной рабочей среды. Способность жестикулировать особенно хорошо подходит для бытовой электроники, особенно в играх, портативных компьютерах и домашних развлечениях (рис. 4).



Рис. 4. Управление телевизором с помощью жестов

Естественный интерфейс датчиков ToF обеспечивает интуитивно понятный игровой интерфейс для видеоигр. Этот же интерфейс может также заменить пульты дистанционного управления и сенсорные экраны (рис. 5). Приложения ToF можно разделить на «жестовые» и «нежестовые». Приложения с жестами подчеркивают взаимодействие с людьми, в то время как приложения без жестов подчеркивают точность измерений.

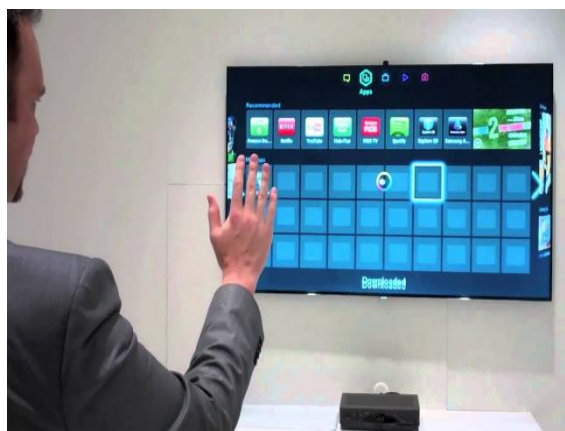


Рис. 5. Управление экраном с помощью жестов

Приложения для жестов преобразуют человеческие движения (лица, руки, пальцы или все тело) в символические директивы для управления игровыми консолями, умными телевизорами или портативными вычислительными устройствами. Например, просмотр каналов можно выполнять взмахом рук, а презентацию можно прокручивать с помощью движения пальцев. Эти приложения обычно требуют быстрого времени отклика, низкой и средней дальности, точности на сантиметровом уровне и малого энергопотребления.

#### **ToF-камеры в смартфонах**

С камерой ToF фотографии имеют больше возможностей для управления глубиной резкости. Ко-

нечно, не обязательно быть фотографом, чтобы воспользоваться увеличенным разрешением камеры ToF по глубине. Автоматические настройки камеры в сочетании с камерой ToF должны создавать изображения с четко определенным передним планом и фоном. Камеру ToF также можно использовать для создания видео с улучшенной стабилизацией изображения или для повышения точности фильтрации. Кроме того, камера ToF телефона может использоваться для расширенного распознавания лиц, жестов и видеоигр AR.

#### *Литература*

1. What is a time-of-flight camera? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.digitalcameraworld.com/features/what-is-a-time-of-flight-camera> свободный (дата обращения: 19.09.2021).
2. Времяпролетный метод: современное состояние развития ToF-технологии и ее применение в 3D-системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://secuteck.ru/articles2/videonabl/vremyaproletnyy-metod-sovremennoe-sostoyanie-razvitiya-tof-tehnologii-i-ee-primeneniye-v-3d-sistemah>, свободный (дата обращения: 19.09.2021).
3. Technical White Paper SLOA190B – January 2014 Revised May 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>, свободный (дата обращения: 19.09.2021).
4. Алгоритм видеодатчика для обработки изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cameraliq.ru/faq/algoritmy-videodatchika-dlia-obrabotki-izobrazheniia/>, свободный (дата обращения: 17.09.2021).
5. Времяпролетные камеры: 2D- и 3D-изображения за один кадр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://secuteck.ru/articles2/videonabl/vremyaproletnye-kamery-2d-i-3d-izobrazheniya-za-odin-kadr>, свободный (дата обращения: 16.09.2021).
6. Что такое ToF-камера и для чего она нужна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://android4all.ru/faq/hardware/2905-tof-camera>, свободный (дата обращения: 18.09.2021).
7. Gokturk Salih Burak, Yalcin Hakan, Bamji Cyrus. A Time-Of-Flight Depth Sensor – System Description, Issues and Solutions // Конф. компьютерного общества IEEE по компьютерному зрению и семинарам по распознаванию образов, 24 января 2005.
8. Iddan Gavriel J., Yahav Giora. 3D-imaging in the studio (and elsewhere...) // Mater. SPIE. (2001-01-24) 4298. Сан-Хосе, Калифорния: SPIE (опубл.: 2003-04-29) (корр.).

**Смирнов Сергей Владимирович**  
Студент ТУСУРа  
Эл. почта: seroga64-30@yandex.ru

**Климкин Тимур Олегович**  
Студент ТУСУРа  
Эл. почта: klimkin.timur13@mail.ru

Т.М. Акаева, М. Назарбек, М.И. Курячий

## Исследование эффективности алгоритмов подавления шумов цифровых изображений

Проведено исследование эффективности алгоритмов подавления шумов цифровых изображений. Представлены результаты разработки программы, позволяющей обрабатывать зашумленное изображение различными методами. В разработанной программе произведена оценка качества изображений обработанными различными алгоритмами подавления шумов.

**Ключевые слова:** шум, обработка изображений, алгоритмы подавления шумов, цифровые изображения, оценка качества цифровых изображений.

При получении или передаче цифровые изображения подвергаются воздействию шумов, что приводит к ухудшению визуального качества и потере информативных участков изображений. Необходимость исправления поврежденных пикселей перед основной обработкой является важной задачей цифровой обработки изображений [1]. В настоящее время существует большое множество способов ослабления уровня шума [2].

Цель работы – исследовать эффективность алгоритмов подавления шумов цифровых изображений.

В данной статье приводятся результаты работы по созданию программы, позволяющей обрабатывать зашумленное изображение различными методами. С помощью GUIDE (среда для создания приложений с графическим интерфейсом пользователя) и редактора m-файлов MatLab разработан графический интерфейс пользователя (рис. 1.)

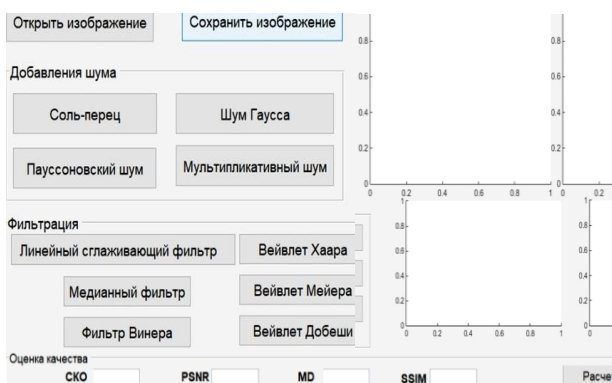


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя разработанной программы

Интерфейс пользователя позволяет выполнить следующие действия.

1. Загрузка исходного изображения, которое преобразуется в формат черно-белого.
2. Вывод гистограммы.
3. Зашумление изображения с помощью одного из представленных шумов (соль-перец, Гаусса, мультипликативный, пауссоновского).
4. Фильтрация зашумленного изображения представленными фильтрами.
5. Оценка качества отфильтрованного изображения.
6. Сохранение результата обработки.

В разработанной программе представлены шесть видов фильтрации цифровых изображений.

1. Медианная фильтрация. Работа медианной фильтрации заключается в последовательном движении апертуры по изображению и замене центрального элемента значения апертуры его медианным значением, исходя из чего получается более гладкое результирующее изображение [3]. В программе используется медианная фильтрация с маской 3×3.

2. Линейный фильтр. Определяется вещественнозначной функцией (ядром фильтра), заданной на растре. Сама фильтрация производится при помощи операции дискретной свертки (взвешенного суммирования). При линейной сглаживающей фильтрации [4] значение интенсивности в каждой точке усредняется по заданной маске:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

3. Фильтр Винера. Алгоритм минимизирует квадратичную ошибку между исходным и восстановленным изображением. Фильтрация Винера является фильтром низких частот, но вместо использования единственного отсечения частоты фильтр использует нижнюю частоту среза в областях с малой детализацией и верхнюю частоту среза для сохранения деталей в областях с краями или другими элементами с высокими отклонениями [5]. В программе используется фильтр Винера с маской 3×3.

Так же в программе реализована вейвлет-фильтрация (три вида фильтров) зашумленных изображений. Вейвлет-фильтрация позволяет разложить изображение на составляющие, соответствующие разным масштабам наблюдения [6]. После производится корректировка коэффициентов разложения, соответствующих малым масштабам, которые в наибольшей степени подвержены влиянию шума. Далее изображение восстанавливается путем проведения обратного вейвлет-преобразования. В программе реализованы три варианта вейвлет-разложения: Хаара, Добеши и Мейера третьего уровня [7].

Для тестирования разработанной программы было выбрано изображение, представленное на рис. 2.

На первом этапе исходное изображение было зашумлено доступными шумами. Так, например, полу-

ченное изображение, зашумленное шумом Гаусса, представлено на рис. 3. Пример работы программы представлен на рис. 4.



Рис. 2. Исходное изображение



Рис. 3. Зашумленное изображение

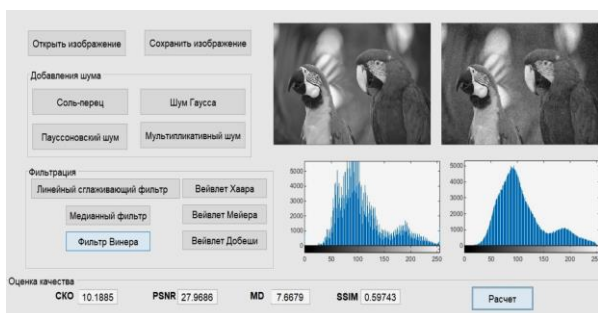


Рис. 4. Результат работы программы

Зашумленное изображение далее было обработано фильтрами (рис. 5).

Обработанные изображения оцениваются с помощью критериев качества изображения. Существуют различные способы оценивания качества изображения от импульсного шума была использована характеристика среднеквадратичного отклонения (MSE), которая рассчитывается по формуле:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} (M_0(i, j) - M(i, j))^2}, \quad (1)$$

где  $N_1, N_2$  – размер изображений в пикселях;  $M_0, M$  – матрицы яркостей исходного и искаженного изображений соответственно.

Вторым критерием оценки качества обработки изображений является характеристика пикового отношения сигнал / шум (PSNR), которое определяется по формуле

$$PSNR = 20 \lg \left( \frac{MAX}{MSE} \right), \quad (2)$$

где  $MSE$  – среднеквадратичное отклонение;  $MAX$  – максимальное значение, принимаемое пикселем изображения.

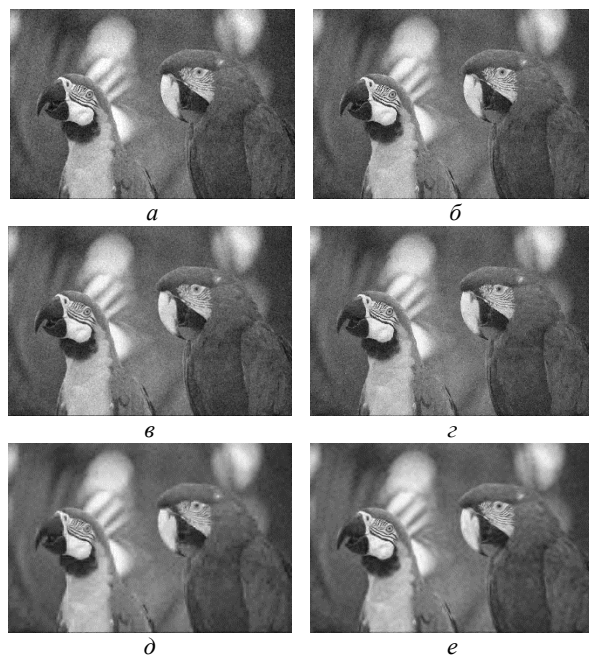


Рис. 5. Изображения, обработанные фильтрами: медианным – а; Винера – б; линейным сглаживающим – в; вейвлетами: Хаара – з; Добеши – д; Мейера – е

Еще одним критерием оценки качества обработки является индекс структурного сходства между двумя изображениями (SSIM). Данная характеристика вычисляется по формуле

$$SSIM(y, s) = \frac{(2\mu_y \mu_s + c_1)(2\sigma_{ys} + c_2)}{(\mu_y^2 + \mu_s^2 + c_1)(\sigma_y^2 + \sigma_s^2 + c_2)}, \quad (3)$$

где  $y, s$  – исходное и обработанное изображения;  $\mu_y$  – среднее  $y$ ;  $\mu_s$  – среднее  $s$ ;  $\sigma_y^2$  – дисперсия  $y$ ;  $\sigma_s^2$  – дисперсия  $s$ ;  $\sigma_{ys}$  – ковариация  $y$  и  $s$ ;  $c_1$  – переменная, равная 6,5025;  $c_2$  – переменная, равная 58,5225.

Величина  $SSIM$  находится в пределах от 0 до 1 и равна 1 при тождественно равных изображениях.

Средняя абсолютная разность широко используется в приложениях обработки сигналов для исследования сходства между двумя векторами. Она рассчитывается как

$$MD = \frac{1}{n \times m} \sum_{(i,j)}^{(m,n)} |I_r(i, j) - I_p(i, j)|$$

Результаты тестирования программы с наложением различных шумов представлены в табл. 1–4.

Таким образом, разработана программа, позволяющая обрабатывать зашумленное изображение различными алгоритмами подавления шума. В данной программе выполнено исследование эффективности данных алгоритмов и произведена оценка качества обработанных изображений.

Таблица 1  
Результаты тестирования с наложением шума Гаусса

Обработка	MSE	PSNR, дБ	MD	SSIM
Зашумленное	25,26	20,08	20,16	0,18
Медианный фильтр	11,41	26,98	8,90	0,51
Фильтр Винера	10,98	27,31	8,37	0,53
Линейный сглаживающий фильтр	10,15	27,99	7,65	0,59
Вейвлет Хаара	12,35	26,29	9,36	0,45
Вейвлет Добеши	9,11	28,94	5,38	0,82
Вейвлет Мейера	8,05	30,01	5,12	0,82

Таблица 2  
Результаты тестирования с наложением шума «соль-перец»

Обработка	MSE	PSNR, дБ	MD	SSIM
Зашумленное	30,87	18,33	6,47	0,26
Медианный фильтр	4,24	35,57	1,71	0,95
Фильтр Винера	22,83	20,95	7,67	0,37
Линейный сглаживающий фильтр	12,01	26,53	7,40	0,56
Вейвлет Хаара	21,88	21,32	7,87	0,34
Вейвлет Добеши	10,81	27,45	6,56	0,71
Вейвлет Мейера	19,89	22,15	10,62	0,34

Таблица 3  
Результаты тестирования с наложением мультипликативного шума

Обработка	MSE	PSNR, дБ	MD	SSIM
Зашумленное	25,58	19,97	20,61	0,22
Медианный фильтр	14,32	25,01	10,74	0,46
Фильтр Винера	13,68	25,40	9,28	0,58
Линейный сглаживающий фильтр	10,55	27,66	7,48	0,63
Вейвлет Хаара	13,87	25,28	9,55	0,55
Вейвлет Добеши	9,60	28,4	5,60	0,81
Вейвлет Мейера	9,98	28,15	6,45	0,73

Таблица 4  
Результаты тестирования с наложением пауссоновского шума

Обработка	MSE	PSNR, дБ	MD	SSIM
Зашумленное	10,38	27,80	8,11	0,52
Медианный фильтр	5,95	32,63	4,16	0,82
Фильтр Винера	4,93	34,26	3,61	0,86
Линейный сглаживающий фильтр	6,61	31,73	4,03	0,85
Вейвлет Хаара	5,93	32,66	3,82	0,86
Вейвлет Добеши	8,64	29,39	4,58	0,84
Вейвлет Мейера	4,90	34,33	3,25	0,89

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200.

#### Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1027 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.technosfera.ru/files/book\\_pdf/0/book\\_311\\_455.pdf](https://www.technosfera.ru/files/book_pdf/0/book_311_455.pdf) (дата обращения: 13.09.2021).
3. Обзор методов цифровой обработки изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studopedia.net/14\\_2822\\_obzor-metodov-tsifrovoy-obrabotki-izobrazheniy.html](https://studopedia.net/14_2822_obzor-metodov-tsifrovoy-obrabotki-izobrazheniy.html)
4. Бухтояров С.С. Удаление шума из изображений нелинейными цифровыми фильтрами на основе ранговой статистики. – М., 2007. – 24 с.
5. Фильтрация Винера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.ptc.com/help/mathcad/r7.0/ru/index.ht> (дата обращения: 18.08.2021).
6. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 304 с.
7. Ясин А.С. Вейвлет-фильтрация зашумленных изображений // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, вып. 2. – С. 50–56.
8. Методика оценки качества изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/digimage/res-noises.shtml>

**Акаева Татьяна Максимовна**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [ttnakaeva@gmail.com](mailto:ttnakaeva@gmail.com)

**Назарбек Мадияр**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [nazarbekmadiar@gmail.com](mailto:nazarbekmadiar@gmail.com)

**Курячий Михаил Иванович**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [kur@tu.tusur.ru](mailto:kur@tu.tusur.ru)

А.А. Новгородов, Н.А. Бородина, М. Назарбек

## Исследование эффективности восстановления изображений, полученных активно-импульсной телевизионной системой с помощью сверточной нейронной сети шумоподавления

Представлена программная реализация метода алгоритма шумоподавления с помощью сверточной нейронной сети. Проведена оценка эффективности алгоритма восстановления изображения, полученного активно-импульсной телевизионной системой.

**Ключевые слова:** сверточная нейронная сеть, шумоподавление, Python, PyTorch, средний квадрат ошибки, функция активации ReLU, активно-импульсная телевизионная система, восстановление изображений.

Активно-импульсные телевизионные системы используются в сложных условиях видения или в условиях недостаточной освещенности изображения, полученные с него будут искажены различными видами шумов [1]. Уровень шума увеличивается из-за усиления яркости изображения. Использование современных методов машинного обучения и нейронных сетей является перспективным направлением в обработке изображений и, в частности, для повышения качества изображений.

### Цель исследования

Реализация модели сверточной нейронной сети шумоподавления и алгоритма её обучения, в том числе разработка загрузчика данных для тестирования и обучения.

Исследование эффективности разработанного алгоритма в восстановлении изображений, полученных с активно-импульсной телевизионной системы.

### Архитектура сверточной нейронной сети шумоподавления

Нейронная сеть – это последовательность нейронов, соединенных между собой синапсами. Структура нейронной сети пришла в мир программирования прямоком из биологии. Благодаря такой структуре нейронная сеть обретает способность анализировать и даже запоминать различную информацию [2].

Нейрон – это вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней простые вычисления и передает ее дальше. Структура нейрона представлена на рис. 1.

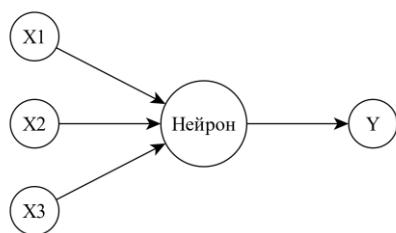


Рис. 1. Структура нейрона

Для повышения качества экспериментальных данных на языке программирования Python с помощью библиотеки нейронных сетей PyTorch была реализована модель сверточной нейронной сети шумоподавления [4]. Архитектура реализованной сети представлена на рис. 2.



Рис. 2. Архитектура сверточной нейронной сети шумоподавления

Нейронная сеть состоит из входного слоя, определенного количества скрытых слоев и выходного слоя. При переходе между слоями к данным применяются пакетная нормализация и функция активации.

Основная идея сверточной сети состоит в том, что обработка участка изображения очень часто должна происходить независимо от конкретного расположения этого участка [3]. Взаимное расположение объектов играет важную роль, но сначала их нужно распознать, а это распознавание – локально и независимо от конкретного положения участка с объектом внутри большой картинки. Сверточная сеть делает это предположение в явном виде, покрывает вход небольшими окнами и выделяет признаки в каждом таком окне локальной нейронной сетью. Визуальное представление операции свертки представлено на рис. 3.

В реализованной модели нейронной сети используется функция активации ReLU. Функция активации – это способ нормализации входных данных и добавление нелинейности в нейронную сеть. В данной работе используется функция активации ReLU. На рис. 4 представлен график данной функции активации.

### Обучение модели нейронной сети для шумоподавления изображений

Для обучения модели нейронной сети был использован набор данных BSD300 (Berkeley Segmenta-



tion Dataset) из Университета Беркли. Набор данных был предназначен для задач сегментации и содержит эталонные изображения различных разрешений [5]. Пример изображения из набора данных представлен на рис. 5.

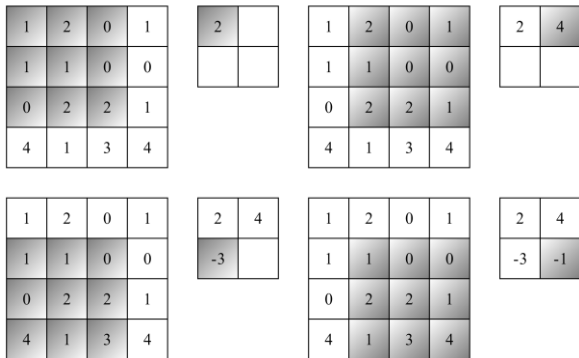


Рис. 3. Визуальное представление операции свертки

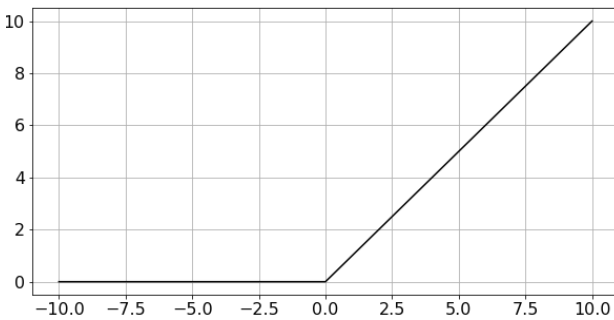


Рис. 4. Функция активации ReLU



Рис. 5. Пример изображения из набора данных BSD300

Для обучения модели был реализован загрузчик набора тренировочных и тестовых данных. Загрузчик возвращает два изображения: искаженное нормальным шумом и исходное чистое. В качестве функции потерь был выбран средний квадрат ошибки. На рис. 6 представлен алгоритм обучения нейронной сети.

Обучение модели нейронной сети происходило в течение 50 эпох. На рис. 7 представлен график функции потерь в ходе обучения.

**Применение нейронной сети на изображении, полученном с активно-импульсной телевизионной системы**

На рис. 8 представлен пример изображения, полученного с активно-импульсной телевизионной системы. Тестовое изображение имеет разрешение 1032×772 элемента.

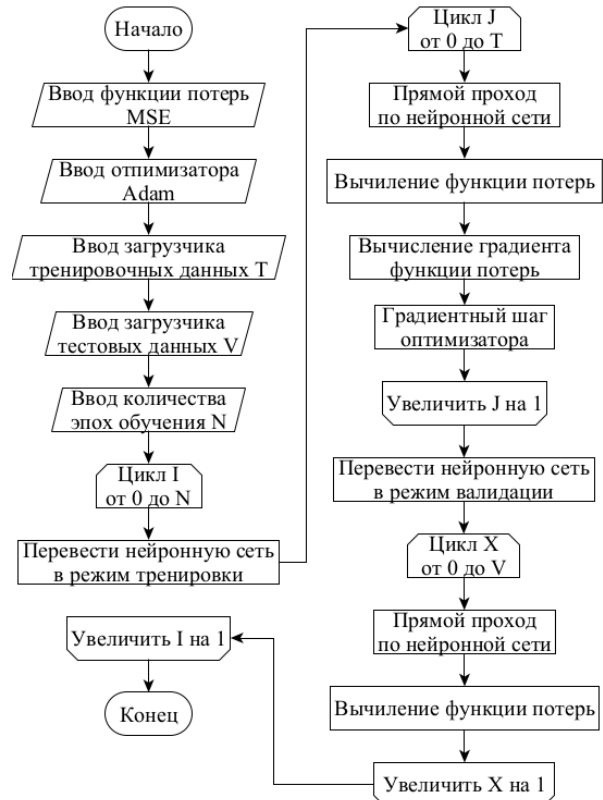


Рис. 6. Алгоритм обучения нейронной сети

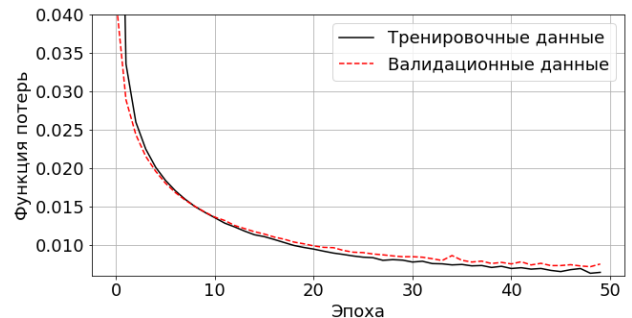


Рис. 7. График обучения модели

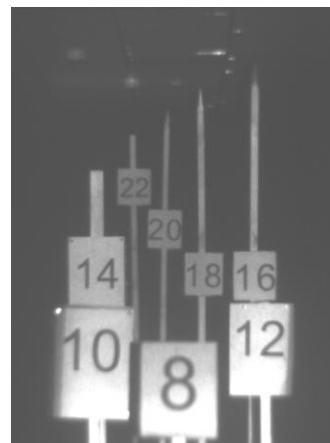


Рис. 8. Экспериментальное изображение

На рис. 9 представлена область тестового изображения до и после применения алгоритма восстановления. Также представлен результат обработки усредняющим фильтром.

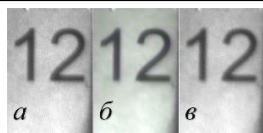


Рис. 9. Область тестового изображения: исходное (а), восстановленное (б), сглаженное (в)

### Оценка качества восстановления изображений и сравнение с усредняющим фильтром

Применение эталонных методов оценки качества изображения невозможно, так как у экспериментальных данных его нет [6]. Для оценки качества восстановления используется средняя линия фонового изображения с длиной в 150 пикселей между цифрами «1» и «2». Для получения эталонных значений была вычислена линейная регрессия среднего между экспериментальными и исходными данными. На рис. 10 представлен график средней линии.

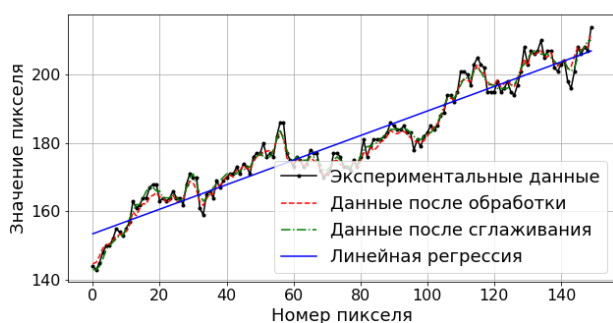


Рис. 10. График средней линии

Средний квадрат ошибки между экспериментальными данными и линейной регрессией составляет 25,63. Средний квадрат ошибки данных после сглаживания и восстановленных данных между линейной регрессией составляет 19,77 и 19,53 соответственно. При этом визуально у результата восстановления более четкие края.

Исходя из результатов наблюдения, представленных на рис. 10, и визуального сравнения областей тестового изображения на рис. 9 можно сделать вывод что алгоритм восстановления с помощью нейронной сети эффективнее, чем усредняющий фильтр, и позволяет сохранить края. В дальнейших исследованиях

предполагается разработать более совершенный алгоритм оценки восстановления изображений и оценить их реальное разрешение после восстановления с помощью анализа контрастно-частотных характеристик.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200.

### Литература

1. Чалдина Е.С. Программная среда для проведения лабораторного практикума «Моделирование активных зон видения активно-импульсных телевизионных измерительных систем» // Современные тенденции развития непрерывного образования: Вызовы цифровой экономики. – Томск: ТУСУР, 2020. – С. 104–105.
2. Николенко С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. – СПб.: Питер, 2020. – 489 с.
3. Шакла Н. Машинное обучение и TensorFlow. – СПб.: Питер, 2019. – 336 с.
4. Zhang K. Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising / K. Zhang, W. Zuo, Y. Chen, D. Meng et al. // IEEE Transactions on Image Processing – 2017. – Vol. 26, No. 7. – P. 3142–3155.
5. Albelaez P., Fowlkes C., Martin D. Набор данных «The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark» [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/> (дата обращения: 29.03.2021).
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2019. – 1104 с.

**Новгородов Александр Александрович**  
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: shaman.king.481516@gmail.com

**Бородина Наталья Александровна**  
Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: borodinana@icloud.com

**Назарбек Мадияр**  
Студент магистратуры каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: nazarbekmadiar@gmail.com

Н.А. Бородина, А.А. Новгородов

## Создание и подготовка наборов данных для решения задачи классификации изображений с применением нейросетевых технологий

Проведен аналитический обзор работ и исследований в области предобработки изображений, формирования набора данных и нейронных сетей для распознавания изображений дорожных знаков. Создана база данных с предобработанными изображениями с применением различных методов аугментации. Разработана и обучена модель для классификации дорожных знаков. Модель была реализована на языке программирования Python с использованием интерактивной оболочки и ядра Jupiter. Произведена оценка классификации изображений обученной модели с помощью тестового набора изображений.

**Ключевые слова:** распознавание объектов, классификация, предварительная обработка, модель распознавания, нейронная сеть.

Нейронные сети в сфере классификации изображений широко используются в разных областях, таких как медицина, безопасность, видеонаблюдение, телевидение и др. [1]. Показательными примерами являются различные системы «автопилота», программное обеспечение для рентгенографических аппаратов, а также применение новейших технологий в сфере создания телевизионного контента. В последнее время использование искусственного интеллекта в сфере здравоохранения стремительно повышается. Одним из наиболее актуальных направлений медицины для применения искусственного интеллекта является рентгенографическая диагностика [2].

Направление развития искусственного интеллекта для вождения транспортных средств также востребовано. Одной из важнейших частей автомобильного автопилота является получение информации об окружении: об объектах, таких как другие автомобили на дороге, пешеходы, ограничивающие или запрещающие знаки дорожного движения.

Для задач классификации необходимо признаковое описание всех данных, которые используются для создания обучающих и тестовых наборов с конечным множеством объектов и известными классами. В результате применения машинного обучения для реализации задачи классификации реализуется модель, способная классифицировать изображение или иной элемент, принадлежащий исходным данным.

На данный момент одна из ключевых проблем, которая не позволяет развиваться сфере создания нейронных сетей для классификации изображений, связана с получением данных [3]. Так как решения этой проблемы напрямую добиться невозможно за короткий срок, следует искать альтернативные варианты решений.

Каждой из рассматриваемых категорий необходима классификация, поэтому актуальность данной практической работы заключается в изучении и реализации различных классифицирующих моделей, а также освоении навыков предобработки входных данных.

Необходимость совершенствования и обновления данных обусловлена развитием сферы примене-

ния классифицирующих моделей, а также внедрением новейших технологий, способствующих корректной работе. Применение искусственного интеллекта приводит к сокращению ошибок, обусловленных человеческим фактором.

Также эта необходимость подтверждается активными исследованиями, разработками в этом направлении; вопросами разработки наборов данных и классифицирующих моделей машинного обучения или нейронных сетей занимается множество специалистов в России и за рубежом.

### Создание и предобработка наборов данных

Большие данные – это обозначение данных, как структурированных, так и нет, огромных объемов и многообразия, которые применимы для обработки различными системами. Название «большие данные» часто применяется; также вариант названия на английском языке «big data», произошел и начал применяться с появлением возможности хранить, анализировать огромные массивы данных, вплоть до мирового объема данных.

Набором данных называется коллекция из логически связанных записей, хранящаяся в табличном виде, в виде кортежа (упорядоченный набор чего-либо в фиксированном и известном количестве). Отличие набора данных от файлов заключается в том, что в наборе данных не может содержаться других файлов, в остальном они схожи. Наборы данных созданы преимущественно для хранения записей группами. В виде записей наборов данных могут служить текстовые данные, объектные файлы, различные модули и т.д. При указании названия и места хранения набора к нему можно обратиться, однако вкладывать или соединять наборы данных недопустимо.

При выявлении отклонений и определении объектов алгоритм опирается на предобученную модель нейронной сети (НС), которая должна соответствовать сфере анализируемых объектов. Подготовка обучающего набора – один из важнейших шагов в процессе реализации модели, от которого зависит как скорость обучения, так и качество работы алгоритма. Для корректной подготовки необходимо решить несколько задач с помощью различных инструментов, которые описаны ниже.

Первым этапом подготовки идет сбор первоначального набора данных, он должен включать в себя как можно больше полезных данных. Чем больше объем данных и выше разнообразие анализируемого объекта, тем выше качество алгоритма. Набор данных обычно составляется с учетом угла обзора, с которого запечатлен объект, освещения, его размера, качества изображения и т.д., насколько объекты, анализируемые алгоритмом, будут иметь сходство с элементами обучающего набора данных нейронной сети [4]. Формирование набора данных из различных вариаций существующих элементов необходимо для корректного обучения, например, вместо одной руки будут присутствовать две руки на рентгеновском снимке.

В данной работе используется набор данных из общедоступного источника под названием «Российская база изображений автодорожных знаков» [5].

Появление разметки данных (data labeling) связано с необходимостью подачи больших объемов информации, специально подготовленной заранее, на вход систем обучения. Big Data – большой объем данных, можно сказать, что это основа всего машинного обучения, в том числе нейронных сетей.

В решении задач классификации, как правило, используется признаковое описание объектов, когда из конечного множества объектов создается выборка с заранее известными классами. Классовая принадлежность объектов, не входящих в выборку, неизвестна. В процессе машинного обучения строится модель, способная классифицировать произвольный объект из исходного множества [6].

Маркировка набора данных изображений, вероятно, является самой утомительной частью всего процесса обучения модели машинного обучения. Сбор изображений для нашего набора данных и последующее аннотирование каждого изображения может показаться сложной задачей. К счастью, теперь у нас есть много программных инструментов, которые позволяют легко выполнять эту задачу и экономить много времени и усилий.

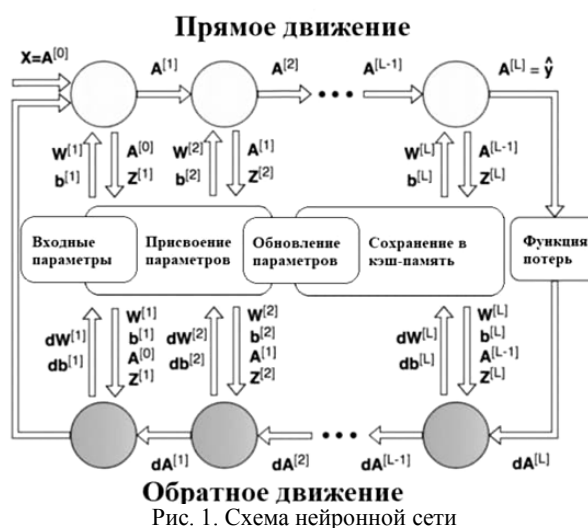
На данный момент одной из ключевых проблем, которая не позволяет развиваться сфере создания нейронных сетей для классификации изображений, является проблема, связанная с получением данных. Так как решения этой проблемы напрямую добиться невозможно за короткий срок, следует искать альтернативные варианты решений. На этом этапе подключается предобработка изображений, а именно – аугментация. Под аугментацией данных понимается этап подготовки к созданию модели нейронной сети, во время которого происходит увеличение выборки данных для обучения через модификацию существующих данных. Как известно, для улучшения качества работы классификатора на базе глубокой НС, используется такой приём, как аугментация (augmentation – увеличение, приумножение) данных, когда во время процедуры обучения НС на вход сети кроме самих тренировочных данных подаются их модификации [7]. Для фотографий это могут быть различные воз-

можные искажения (повороты, отражения по вертикали и горизонтали, шум, изменение размера, изменения цветовой гаммы, обрезка и т.п.).

### Нейронные сети для распознавания изображений

Целью работы является создание программы, способной сформировать полносвязную нейронную сеть с заданной архитектурой (количество и размер слоев и соответствующая функция активации). Пример такой сети представлен на рис. 1. Прежде всего необходимо обучить нейронную сеть и делать прогнозы, используя ее.

На схеме нейронной сети показано, какие операции необходимо выполнять во время обучения нейронной сети. Она также показывает, сколько параметров необходимо обновить и прочитать на разных этапах одной итерации.



В нейронных сетях происходит имитация биологического нейрона мозга человека с помощью активационной сигмоидальной функции (для задач классификации именно эта функция применяется чаще других, но возможно применение и других функций). Работа функции заключается в пропуске информации, если она соответствует ранее обозначенным входным параметрам функции. Именно этот процесс включения имитирует воздействие на биологический нейрон в мозге.

Так как рассматривается классификация изображений в различных сферах применения, необходимо описать признаки каждого из наборов данных.

Для построения полносвязной нейронной сети необходимо импортировать следующие библиотеки:

1. Numpy – расширение, добавляющее поддержку больших многомерных массивов и матриц, вместе с большой библиотекой высокоуровневых математических функций для операций с этими массивами.

2. Matplotlib – библиотека для визуализации данных двумерной (2D) графикой (3D-графика также поддерживается).

3. Keras – открытая нейросетевая библиотека, нацеленная на оперативную работу с сетями глубин-

ного обучения, которая спроектирована так, чтобы быть компактной, модульной и расширяемой.

С помощью библиотеки keras строится модель классификатора с фиксированным количеством узлов в сети. В данной работе были выбраны 128 узлов одного скрытого слоя нейронной сети.

После этого необходимо произвести компиляцию модели. Делается это методом `model.compile`, необходимыми параметрами для которого являются:

1. Функция потерь, которая измеряет, насколько точна модель во время обучения. В данной работе такой функцией является перекрестная энтропия.

2. Оптимизатор, задачей которого является минимизация функции потерь, называется Adam. Данный алгоритм выполняет задачу градиентной оптимизации стохастических целевых функций первого порядка, основанный на адаптивных оценках моментов более низкого порядка.

3. Метрика – это функция, которая используется для оценки работы модели. Используется метрика `accuarcy`.

Следующим этапом является процесс обучения нейронной сети. Так как метки для обучения модели, с которой она сможет ассоциировать изображения, уже известны, можно проверить точность предсказаний.

Обучение запускается методом `fit`, который имеет следующие минимально необходимые параметры: обучающая выборка; метки классов обучающей выборки; количество эпох (количество повторений в обучении).

На обучение было затрачено около 17 часов, это объясняется низкой вычислительной мощностью используемого компьютера и сложностью вычислений, производимых при обучении.

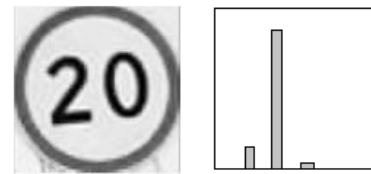
Далее была произведена оценка классификационной способности модели. Для этого необходимо вызвать метод `evaluate` у модели, на вход которому подается тестовый набор данных и соответствующий ему вектор меток классов. Точность на тестовом наборе зачастую будет ниже, чем на обучающей выборке. Чем выше этот разрыв, тем больше показатель переобучения, и тогда необходимо варьировать параметры модели и количества эпох.

На рис. 2 представлен экземпляр тестовой выборки и вероятность отнесения экземпляра к каждому из классов. Данная визуализация реализована при помощи библиотеки `matplotlib`.

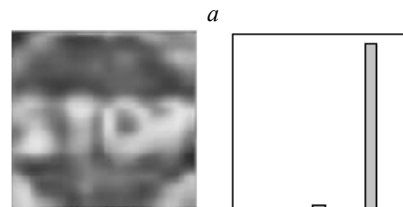
На рис. 3 представлены диаграмма распределения точности по заданным классам, а именно: «въезд запрещен» (1), «движение запрещено» (2), «место для разворота» (3), «поворот запрещен» (4), «разворот запрещен» (5), «обгон запрещен» (6), «ограничение максимальной скорости» (7), «стоянка запрещена» (8), «главная дорога» (9), «движение без остановки» (10), различные предписывающие знаки движения (11 и 12), «место стоянки» (13), рекомендуемые скорости (14), «тупик» (15). Получившиеся значения по классам представлены в таблице.

Для улучшения точности предсказания можно продолжить обучение на еще более расширенной

базе данных с использованием изображений, полученных в условиях плохой видимости с применением активно-импульсных телевизионных измерительных систем.



ограничение скорости 20, вероятность 85%



стоп, вероятность 92%

б

Рис. 2. Примеры визуализации вероятности: ограничение скорости 20 – а, стоп – б

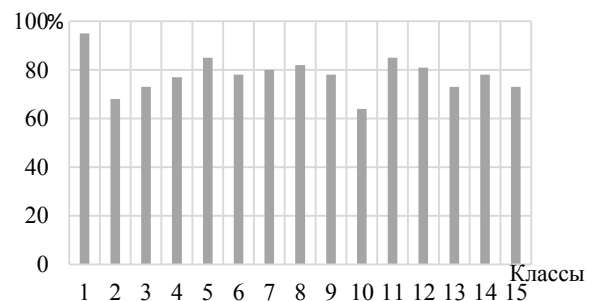


Рис. 3. Распределение точностей по классам

#### Полученные результаты точностей

Класс	1	2	3	4	5
Значение, %	95	68	73	77	85
Класс	6	7	8	9	10
Значение, %	78	80	82	78	64
Класс	11	12	13	14	15
Значение, %	85	81	73	78	73

Во время распознавания большую роль играет качество полученных изображений, а в сложных условиях видимости, которые часто встречаются на снимках дорожных знаков, дальность действия и вероятность распознавания объектов значительно ограничивается [8]. Нейтрализация помех, связанных с обратным рассеянием с помощью активно-импульсной телевизионной системы способствует развитию систем зрения роботов и, в частности, устройств «автотополота» [9].

Также модель применима и для изучения и классификации изображений в других сферах.

#### Заключение

В ходе данной работы было проведено углубленное исследование создания классифицирующих моделей нейронных сетей и наборов данных, необходимых для работы модели. Получены теоретические

знания по выявлению основных признаков изучаемых объектов и выделению классов, к которым они принадлежат. Было выявлено, что составляющие элементы наборов данных оказывают значительное влияние на результат работы модели, что их необходимо четко систематизировать и тщательно изучать сферу, для которой применяется данная модель. Также представлены результаты тестирования классифицирующей модели дорожных знаков, созданной на основе размеченного набора данных. При оптимизации параметров нейронной сети для 15 классов была достигнута максимальная точность 78%. Модель возможно использовать, также можно расширить набор данных и обучить ее заново.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200.

#### *Литература*

1. Фаустова К.И. Нейронные сети: применение сегодня и перспективы развития // Территория науки. – 2017. – №1. – С. 83–87.
2. Поряева Е.П. Искусственный интеллект в медицине / Е.П. Поряева, В.А. Евстафьева // Вестник науки и образования. – 2019. – № 6-2 (60). – С. 43–45.
3. Молотков М.С. Эволюционный подход к настройке и обучению нейронной сети / М.С. Молотков, А.К. Новиков // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С. 69–71.
4. Робертс Л. Автоматическое восприятие трехмерных объектов // Интегральные роботы: пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – С. 162–208.
5. Шахуро В.И. Российская база изображений автодорожных знаков / В.И. Шахуро, А.С. Коношин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 294–300.
6. Моисеев И.В. Решение лингвистических задач с помощью нейронных сетей с учителем на примере задачи о распознавании слов прилагательных английского языка / И.В. Моисеев, Л.А. Жуков // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2009. – № 4. – С. 146–151.
7. Карпова И.П. Базы данных. Курс лекций и материалы для практических заданий: учеб. пособие. – М.: Питер, 2013. – 240 с.
8. Чалдина Е.С. Многозонный метод измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами / Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий // Междунар. конф. молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам: матер. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.
9. Капустин В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: дис. ... канд. техн. наук, 05.12.04: защищена 20.12.17. – 2017. – 118 с.

---

**Бородина Наталья Александровна**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: borodinana@icloud.com

**Новгородов Александр Александрович**

Аспирант каф. каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: shaman.king.481516@gmail.com

О.Е. Гончарова, Н.М. Поломарчук, А.В. Каменский

## Исследование двумерного шестикаскадного фильтра повышения четкости изображения

Современная жизнь предполагает собой широкое использование видео- и фототехники, при этом проблема шума и помех все еще остается актуальной. Рассматривается одна из возможностей подавления шума и помех, повышения визуальной четкости и резкости изображения. Предложенный в работе метод был опробован на различных изображениях и показал свою работоспособность, которая видна не только визуально, но и подтверждена количественной оценкой разрешения на исходном и обработанном изображениях.

**Ключевые слова:** шумы, цифровой фильтр, свёртка, рециркулятор, матрица фильтра, резкость, качественные характеристики изображения.

Наличие шумов и помех в сигналах является проблемой в современном техническом мире, так как они определяют границы точности измерений и величины сигналов.

Чтобы техника и человек лучше воспринимали изображение, были поставлены задачи цифровой обработки для создания алгоритмов, которые устраняли бы эти искажения при выводе изображения.

Обработка изображений – это обработка информации любой формы, представленной в виде изображения. Основная цель повышения резкости заключается в выделении мелких деталей или улучшении четкости тех деталей, которые оказались расфокусированы [1].

### Описание фильтра

Системная функция фильтра определяется из алгоритма его построения, которая включает в себя 6 строчных и 6 кадровых рециркуляторов, исходную маску, умноженную на коэффициент 256 и наложенную на центральную маску, и из задержек на элемент и строку. Данная функция описывается двумерной системной функцией фильтра.

$$H_2(z_1, z_2) = -\frac{(1-z_1^{-2})^{11}}{(1-z_1^{-1})^{11}} + 256z_1^{-2}z_2^{-2} \times \frac{(1-z_1^{-2})^4}{(1-z_1^{-1})^4} + z_1^{-3}z_2^{-3}. \quad (1)$$

Фильтр основан на свертке: изображение (принимается за единицу) сворачивается с шестью рециркуляторами, сначала по строке, затем они же шесть раз сворачиваются по кадру. В результате получаем 6 строчных и 6 кадровых значений. Выглядит это так:

$$\begin{aligned} & [1] \text{ с } [1 \ 1] \text{ шесть раз.} \\ & [1]**[1 \ 1]**[1 \ 1]**[1 \ 1]**[1 \ 1]**[1 \ 1]**[1 \ 1] = \\ & = [1 \ 6 \ 15 \ 20 \ 15 \ 6 \ 1]. \end{aligned}$$

После строчной свертки с 6 рециркуляторами получена промежуточная матрица значений, равная [1 6 15 20 15 6 1], теперь необходимо свернуть её шесть раз по кадру. В результате мы получили маску размером 7×7 (рис. 1).

1	6	15	20	15	6	1
6	36	90	120	90	36	6
15	90	225	300	225	90	15
20	120	300	400	300	120	20
15	90	225	300	225	90	15
6	36	90	120	90	36	6
1	6	15	20	15	6	1

Рис. 1. Маска после свертки с рециркуляторами

Поскольку данная маска будет формироваться на отрицательной ветви фильтра, то необходимо так изменить центральную маску (3×3), чтобы она стала положительной и при этом сумма ее элементов и сумма остальных всех элементов «внешних колец» была равна нулю. Для этого необходимо наложить на нее маски 3×3. То есть нужно сделать маску 3×3 равной сумме всех коэффициентов исходной маски 7×7 либо близкой к этому, чтобы вследствие ее суммирования с центром маски получилась маска, равная сумме внешних колец (рис. 2).

256	512	256
512	1024	512
256	512	256

Рис. 2. Маска после свертки с рециркуляторами

Также необходимо подобрать такие коэффициенты к центральной маске 3×3, чтобы при вычитании маски 3×3 из маски 7×7 сформировать положительную центральную часть размером 3×3, которая компенсирует отрицательную часть, остающуюся от маски 7×7, и сумма должна равняться нулю.

Полученную маску 3×3 необходимо вычесть из центральной части маски 7×7 с отрицательными значениями и в результате получить необходимую для дальнейшей работы маску (рис. 3).

-1	-6	-15	-20	-15	-6	-1
-6	-36	-90	-120	-90	-36	-6
-15	-90	31	212	31	-90	-15
-20	-120	212	624	212	-120	-20
-15	-90	31	212	31	-90	-15
-6	-36	-90	-120	-90	-36	-6
-1	-6	-15	-20	-15	-6	-1

Рис. 3. Полученная маска фильтра

Работа шестикаскадного фильтра (рис. 4) заключается в подаче сигнала на три ветви, каждая из которых выполняет соответствующую функцию. Первая ветвь представляет собой свертку двумя строчными и кадровыми рециркуляторами, что предназначается для подъема центральной маски, а также элементы задержки.

На второй ветви происходит свертка шести строчных и шести кадровых рециркуляторов. В третьей ветви находится коэффициент, который явля-

ется оптимальным коэффициентом для увеличения центрального элемента матрицы и задержки. В итоге со всех ветвей поступает сигнал с определенным знаком на сумматор и реализуется двумерный фильтр в соответствии с выражением (1) [2].

**Оптимизация фильтра**

На основе данного фильтра и используя матрицу, приведенную на рис. 3, путем экспериментального выбора центрального элемента определяется оптимальный коэффициент фильтрации.

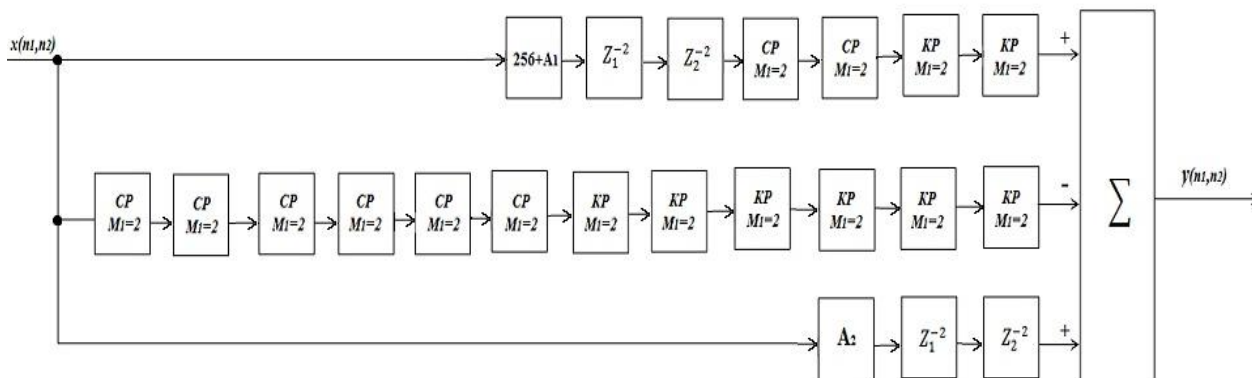


Рис. 4. Структурная схема двумерного шестикаскадного фильтра

Используя исходный коэффициент, равный 624, и применяя его на различных изображениях, было отмечено, что изображение ухудшается. Ухудшилось и его визуальное восприятие, из чего можно сделать вывод, что и качественные характеристики также ухудшились.

Для выполнения поставленной задачи было использовано два программных обеспечения (ПО): ImageJ и Imatest:

- ImageJ – программа с открытым исходным кодом для анализа и обработки изображений [3];
- Imatest – комплексный программный пакет, позволяющий производить различные измерения, связанные с оценкой качества изображения.

Оценка разрешающей способности доступна в модуле SFR, который измеряет контрастно-частотную характеристику изображения или функцию передачи модуляции.

Первая часть работы заключалась в подборе оптимального коэффициента фильтрации. Сначала была попытка снизить коэффициент. Уменьшение его на 10, 20 и 30 желаемого результата не приносило. Были выполнены подборка различных коэффициентов и вычисление ТВЛ полученных изображений. Результаты эксперимента приведены в таблице. Количество ТВЛ – телевизионных линий – рассчитывалось по формуле (2):

$$ТВЛ = (CPR / 0,5) \times \text{«Предельное значение в ТВЛ»}, \quad (2)$$

где CPR – число циклов на пиксель; «Предельное значение в ТВЛ» – разрешение, при котором одна линия приходится на один пиксель.

Решение снизить его до 500 и 540 было не самым верным. Визуально оно стало резче и менее размытым, но для комфортной работы этого было недостаточно. Затем увеличение коэффициента до значения 780 принесло положительный результат. Изображение стало гораздо качественнее, выделились и стали более четкими размытые границы.

Дальнейшее повышение коэффициента не принесло видимых результатов и не отличалось между

собой. Поэтому оптимальным коэффициентом при визуальной оценке является значение 780. Результаты работы приведены на рис. 5–7.

Вторая часть работы была выполнена в ПО Imatest с помощью модуля SFR. С целью подтверждения корректно подобранного коэффициента матрицы, произведена качественная оценка характеристики полученных изображений. Для графиков были использованы значения MTF – частотно-контрастной характеристики, от CPP – количество циклов на дюйм.

**Результат подбора коэффициента**

Изображение тестовых таблиц	Подобранный коэффициент									
	Значение ТВЛ исходного изображения	500	540	580	600	624	700	780	790	800
1	143	49	462	747	1630	28	557	222	220	218
2	98	37	354	160	157	203	584	366	375	365
3	317	57	54	55	58	0	1846	1359	1337	1319

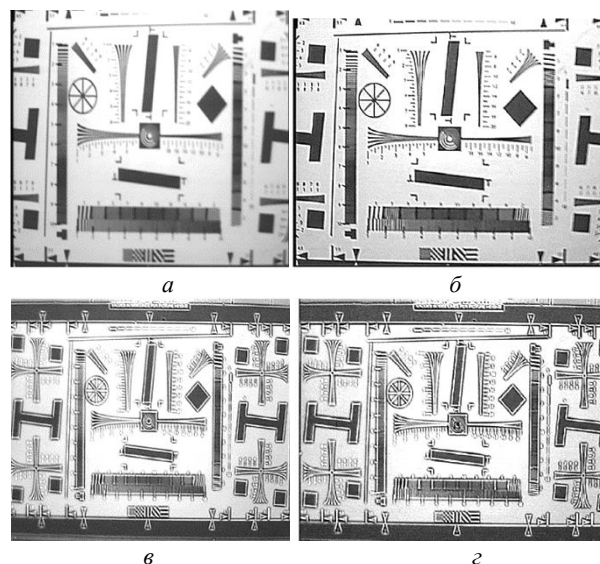


Рис. 5. Тестовая таблица 1: а – исходное изображение, обработанное с коэффициентом: б – 780; в – 500; г – 540



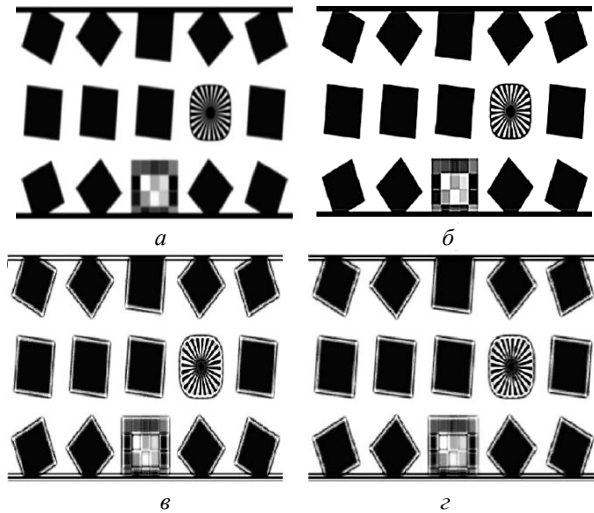


Рис. 6. Тестовая таблица 2: *a* – исходное изображение, обработанное с коэффициентом: *б* – 780; *в* – 500; *з* – 540

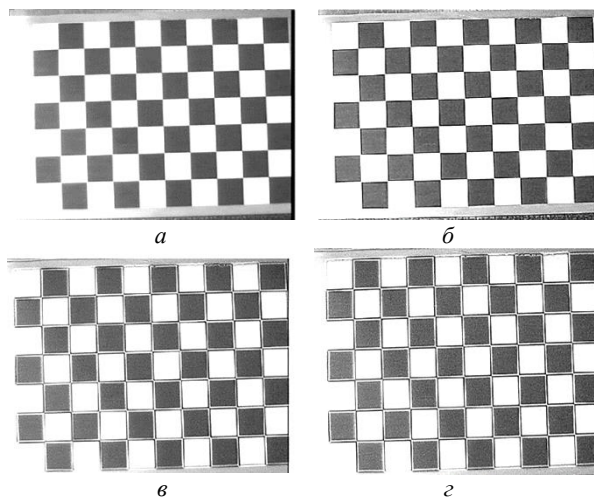


Рис. 7. Тестовая таблица 3: *a* – исходное изображение, обработанное с коэффициентом: *б* – 780; *в* – 500; *з* – 540

На представленных рисунках отчетливо видно, что при обработке изображений маской с коэффициентом 780 их качество заметно улучшается. Чтобы подтвердить это количественно, ниже представлены графики показателей разрешения всех изображений (рис. 8–10).

Как видно из графиков, оптимальные значения коэффициентов равны 780. На значения 500 и 540 в начале графика приходится самые высокие скачки MTF.

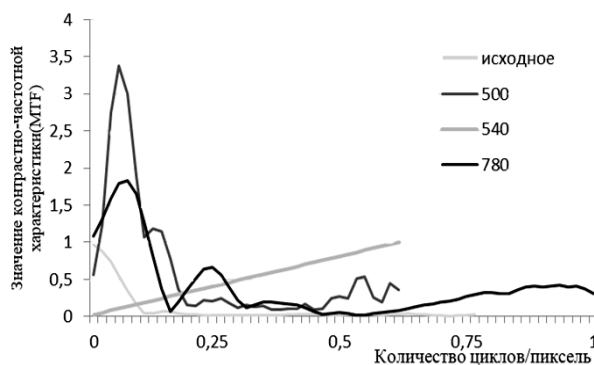


Рис. 8. Зависимость разрешения изображений (см. рис. 5)



Рис. 9. Зависимость разрешения изображений (см. рис. 6)

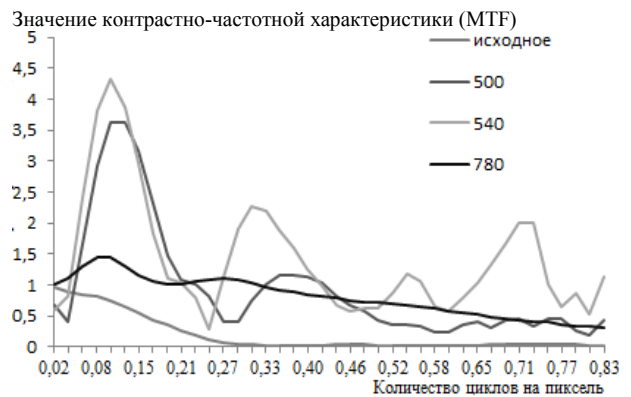


Рис. 10. Зависимость разрешения изображений (см. рис. 7)

### Заключение

Изменяя значения коэффициентов, которые приведены в таблице, можно было заметить также визуальное изменение изображений. Был найден оптимальный коэффициент, работа которого удовлетворяла визуальным требованиям к изображениям (четкость, выделение размытых линий и увеличение контрастности). Данный коэффициент равен 780. Для наглядности эксперимента на рисунках приведено 4 изображения: исходное, оптимальное и два экспериментальных, доказывающих, что уменьшение коэффициента не дает положительных результатов. Для подтверждения полноты эксперимента было снято 9 значений коэффициентов для различных изображений. Выполнен расчет значения ТВЛ и различных данных (таблица), из которых наглядно видно изменение значений в зависимости от коэффициента фильтрации.

На тестовой таблице 1 (см. рис. 5) при обработке данным фильтром визуально заметно улучшение четкости границ. Из-за усиления контрастности контуров на изображении количество ТВЛ получилось завышенным, что объясняется низким качеством изображения. Для тестовых таблиц 2 и 3 количество ТВЛ осталось в рамках нормы. Также видно, что увеличение коэффициента выше 780 не приносит ощутимых результатов, особенно они не видны при визуальной оценке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

*Литература*

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, В. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Каменский А.В. Рекурсивно-сепарабельные методы и алгоритмы повышения качества изображений в телевизионных измерительных системах / А.В. Каменский, М.И. Курячий. – Томск, 2018. – 10 с.
3. ImageJ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ImageJ>, свободный (дата обращения: 18.09.2021).

**Гончарова Ольга Евгеньевна**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: naklei98@mail.ru

**Поломарчук Никита Михайлович**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: x-nikita10@mail.ru

**Каменский Андрей Викторович**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: andru170@mail.ru

С.В. Серебренников, В.А. Семиглазов

## Получение физической копии модели с использованием 3D-технологий

Представлены результаты получения точной 3D-модели физического объекта. Приведены результаты минимального отклонения цифровых и воспроизведенных моделей. Проведен сравнительный анализ полученных копий объектов с оригиналами. Удалось добиться минимальных отклонений от оригинального объекта.

**Ключевые слова:** 3D-сканирование, 3D-печать, 3D-технологии, получение объекта, цифровая модель.

Трехмерное, или 3D-сканирование, – это процесс представления физического объекта его цифровой моделью. Для получения трехмерных моделей существует множество устройств сканирования, выполненных по различным технологиям. Актуальность исследования заключается в техническом производстве, такое сканирование значительно ускоряет производственный процесс, избавляя от необходимости применять механическое моделирование. В ходе исследований необходимо получить точную 3D-модель объекта. Модель должна иметь минимальные отклонения, которые допустимы при использовании 3D-сканера. Полученные данные о точности сканера представлены в табл. 1 [1].

Перед началом эксперимента необходимо выбрать объект сканирования, ниже представлена таблица с типами объектов сканирования [2].

Таблица 1

Типы объектов сканирования		
Идеальные условия	Условия, вызывающие затруднения	Результат работы в неидеальных условиях
Твердый объект	Деформируемый объект	Части объекта, отсканированные с разных ракурсов искажены. Возникают проблемы при совмещении частей в единое изделие
Матовый объект	Блестящий или полупрозрачный объект	В 3D-модели на этих местах будут «дыры», требуется их предварительное «матирование»
Гладкий объект	Наличие острых ребер	Острые края немного смягчаются, желательно соблюдать правила взаимного расположения сканера и острых краёв

В данном случае это была пластиковая фигурка. Фигура имеет несложную текстуру, а также подходящий для 3D-сканера цвет. Цвет объекта играет немаловажную роль в процессе сканирования, от цвета зависит корректное распознавание объекта и формирование правильной 3D-модели. Для чистоты эксперимента были взяты две модели – одна фигура, сделанная из керамики, и цилиндрический объект [3].

Для работы с точностью 3D-сканера необходимо зафиксировать размеры объекта (рис. 1). Измерялись

такие параметры, как длина, ширина и высота. Все размеры моделей представлены ниже в табл. 2.



Рис. 1. Фиксирование размеров оригинала

Таблица 2

Параметры размеров			
Наименование	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Пластик	47,50	50,00	71,20
Керамика	49,98	42,60	76,00
Цилиндр	–	29,56	52,08

Объект размещается на центр стола и далее выполняется процесс сканирования, предварительно подбирая режимы освещения. Сканирование производилось при дневном освещении. Чтобы узнать размер модели и отклонение ее от оригинала, необходимо загрузить 3D-образ в программу NetFabb [4].

Изначально сканирование проводилось при дневном свете. В программе сканера был подобран режим «яркий». По завершении сканирования была получена корректная 3D-модель.

По завершении сканирования всех объектов при дневном свете и при всех возможных режимах сканирования следует повторить весь эксперимент при ночном освещении. Все готовые модели загружаются в программу Autodesk NetFabb (рис. 2). Поочередно просматривались все полученные модели и фиксировались их размеры, которые были представлены в программе. Ниже представлены табл. 3–5 с размерами полученных моделей.

После получения всех данных о размерах необходимо узнать отклонение от оригинальных объектов по всем параметрам размеров. Ниже представлены табл. 6–8 с отклонениями от оригиналов.

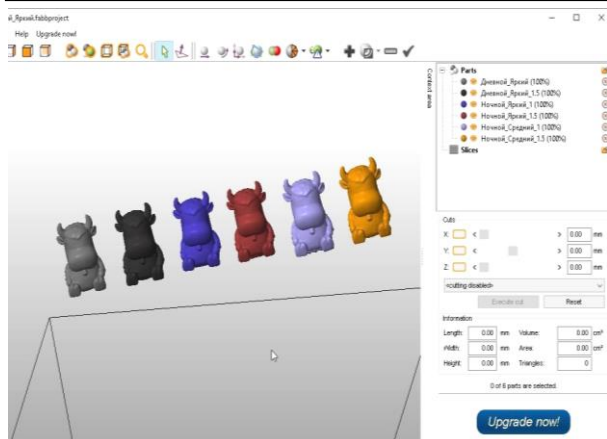


Рис. 2. Autodesk NetFabb

Таблица 8

**Отклонение размеров (цилиндрическая фигура)**

Ширина, мм	Высота, мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
29,56	52,08	—	—
29,60	52,02	0,04	0,06
29,66	52,17	0,10	0,09

При дневном освещении происходит засвечивание объекта, следовательно, происходит падение точности сканирования, чаще всего при дневном свете подходят такие режимы как «яркий» и «менее яркий».

При ночном освещении сканер не всегда достоверно распознает объект сканирования. При правильном подборе режима получаем корректную 3D-модель объекта, поскольку отсутствует «засветка» объекта, поступающая из внешней среды.

Выбранные модели были отобраны для дальнейшей 3D-печати (рис. 3). Подготовка к 3D-печати производилась в программе Cura. Все модели фиксируются по полученным значениям размеров (рис. 4). Не стоит также забывать, что 3D-принтер имеет определенную точность. Ниже представлены табл. 9–11 с результатами всех этапов проведения эксперимента и результаты полученных отклонений, удовлетворяющих 3D-образам [5].

Таблица 3

**Данные о 3D-моделях (пластиковая фигура)**

Режим сканирования	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Оригинал	47,50	50,00	71,20
Яркий	47,58	50,05	71,25
Менее яркий	48,02	51,38	73,16
Яркий	47,41	50,07	71,12
Менее яркий	47,48	50,08	71,29
Средний	49,61	53,02	76,18
Менее средний	50,91	53,57	75,91

Таблица 4

**Данные о 3D-моделях (керамическая фигура)**

Режим сканирования	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Оригинал	49,98	42,60	76,00
Яркий	50,06	42,65	76,08
Яркий	49,89	42,53	75,91
Менее яркий	51,27	43,67	77,01

Таблица 5

**Данные о 3D-моделях (цилиндрическая фигура)**

Режим сканирования	Ширина, мм	Высота, мм
Дневное	29,56	52,08
Ночное	29,60	52,02

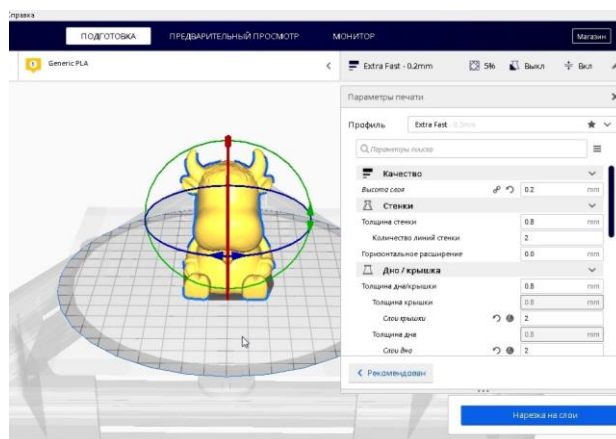


Рис. 3. Подготовка моделей к печати

Таблица 6

**Отклонение размеров (пластиковая фигура)**

Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Отк. по дл., мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
47,50	50,00	71,20	—	—	—
47,58	50,05	71,25	0,08	0,05	0,05
48,02	51,38	73,16	0,52	1,38	1,96
47,41	50,07	71,12	0,09	0,07	0,08
47,48	50,08	71,29	0,02	0,08	0,09
49,61	53,02	76,18	0,11	3,02	4,98

Таблица 7

**Отклонение размеров (керамическая фигура)**

Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Отк. по дл., мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
49,98	42,60	76,00	—	—	—
50,06	42,65	76,08	0,08	0,05	0,08
49,89	42,53	75,91	0,09	0,07	0,09
51,27	43,67	77,01	1,29	1,07	1,01



Рис. 4. Фиксирование размеров напечатанной копии

Таблица 9  
Результаты всех этапов и отклонение  
(пластиковая фигура)

Назв.	Дл., мм	Шр., мм	Выс., мм	Отк. по дл., мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
Орг.	47,50	50,00	71,20	–	–	–
Скн.	47,41	50,07	71,12	0,09	0,07	0,08
Пчт.	47,43	50,03	71,16	0,07	0,03	0,04

Таблица 10  
Результаты всех этапов и отклонение  
(керамическая фигура)

Назв.	Дл., мм	Шр., мм	Выс., мм	Отк. по дл., мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
Орг.	49,98	42,60	76,00	–	–	–
Скн.	50,06	42,65	76,08	0,08	0,05	0,08
Пчт.	50,07	42,70	76,10	0,09	0,10	0,10

Таблица 11  
Результаты всех этапов и отклонение  
(цилиндрический объект)

Назв.	Шир., мм	Выс., мм	Отк. по шир., мм	Отк. по выс., мм
Орг.	29,56	52,08	–	–
Скн.	29,60	52,02	0,04	0,06
Пчт.	29,63	52,01	0,07	0,07

### Заключение

3D-сканирование объектов соответствует характеристикам при режимах: яркий и менее яркий при дневном и ночном освещении; 3D-принтер имеет определенную погрешность при воспроизведении модели. По результатам эксперимента удалось добиться погрешности не более 0,1 мм. Следовательно, все напечатанные модели после сканирования получились качественные и соответствуют требованиям к размерам своих оригиналов [6].

### Литература

1. Семиглазов В.А., Валова А.С., Ильина О.Д. Разработка компетентностной карты набора программ ДПО «Управление предприятием сервиса» // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 112–114.
2. Типы объектов сканирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.2d-3d.ru> (дата обращения: 10.08.2021).
3. 3D-сканирование, 3D-прототипирование различных трехмерных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.altstu.ru/structure/unit/cms/article/3d\\_objects/](https://www.altstu.ru/structure/unit/cms/article/3d_objects/) (дата обращения: 15.08.2021).
4. Иванова Е.В., Ильина О.Д., Тамарова А.О. Разработка учебно-тематического плана программы ДПО «3D-сканирование. Обработка изображения после сканирования» // XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Научная сессия ТУСУР»: в 5 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018.
5. Как 3D-сканирование решает вопросы контроля качества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/> (дата обращения: 25.08.2021).
6. Программное обеспечение для 3D-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ultimaker.ru> (дата обращения: 25.08.2020).

---

**Серебренников Сергей Владимирович**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [sereog.seriy@yandex.ru](mailto:sereog.seriy@yandex.ru)

**Семиглазов Вадим Анатольевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [vadim.tusur@mail.ru](mailto:vadim.tusur@mail.ru)

Г.Е. Эдель, В.В. Капустин, М.Е. Сукотнова

## Исследование алгоритма распознавания пешеходов с использованием NVIDIA Jetson Nano и модели MobileNet V2

Представлены результаты исследований в области компьютерного зрения. С помощью микрокомпьютера NVIDIA Jetson Nano была протестирована модель MobileNet V2 на способность распознавать пешеходов при различных условиях съемки.

**Ключевые слова:** NVIDIA Jetson Nano, MobileNet V2, распознавание пешеходов, система помощи водителю, беспилотные автомобили.

Помимо того, что каждое дорожно-транспортное происшествие, особенно с трагическими последствиями, является личной трагедией, оно также создает большую проблему для общества в целом. Число погибших в дорожно-транспортных происшествиях в России в 2020 г. составляет более 16 000 человек и 183 тысячи получили ранения. Более 4 000 человек погибли в результате наезда на пешеходов. Показатель смертности на дорогах неуклонно растет из года в год. Поэтому вполне логично, чтобы прилагались усилия к тому, чтобы количество аварий не только не увеличивалось, но и постепенно уменьшалось. В связи с этим, а также взяв во внимание то, что на сегодняшний день до сих пор не создана система, достаточно эффективная для беспилотных транспортных средств и систем помощи водителю, можно сделать выводы о необходимости исследований в данном перспективном направлении.

### NVIDIA Jetson Nano

Алгоритм для распознавания пешеходов был реализован и запущен на микрокомпьютере NVIDIA Jetson Nano, изображенном на рис. 1. Этот комплект для разработки обеспечивает вычислительную мощность и функциональность для применения современного искусственного интеллекта (ИИ) с помощью недорогой, простой в использовании платформы с низким энергопотреблением.



Рис. 1. Комплект разработчика NVIDIA Jetson Nano

Комплект поддерживается комплексным NVIDIA® JetPack™ SDK, который включает L4T (Linux для Tegra, дистрибутив Linux для Ubuntu Desktop с драйверами NVIDIA), библиотеки и интерфейсы прикладного программирования (API) с использованием искусственного интеллекта и компьютерного зрения, инструменты разработки, документацию и образцы кодов.

Полный комплект состоит из модуля Jetson Nano, оснащенного пассивным радиатором, который устанавливается в слот SO-DIMM на несущей плате (иногда также на базовой плате). Он содержит большое количество разъемов для подключения периферийных устройств [1, 2].

### Модель MobileNet V2

MobileNet V2 – это архитектура, которая использует быстрые соединения между слоями, а также глубокие свертки, оба метода позволяют снизить количество математических операций. Модель имеет три слоя свертки в блоке, как показано на рис. 2. Первый слой блока представляет собой свертку  $1 \times 1$ , и его цель состоит в том, чтобы расширить количество каналов в данных, прежде чем они перейдут в свертку по глубине. Глубинная свертка фильтрует входные данные, за которой затем следует точечный слой свертки  $1 \times 1$ . Точечная свертка, называемая проекционным слоем, уменьшает количество каналов и, таким образом, уменьшает объем данных, проходящих через сеть.



Рис. 2. Слои в каждом остаточном блоке

Вход и выход блока являются тензорами низкой размерности, в то время как фильтрация внутри блока выполняется на тензоре высокой размерности. Остаточное соединение существует, чтобы помочь с пото-

ком градиентов через сеть, и используется только тогда, когда количество каналов, входящих в блок, совпадает с количеством каналов, выходящих из него.

Преимущество MobileNet V2 перед MobileNet V1 заключается в том, что входные данные, подаваемые на тензоры (связи между каждым блоком свертки), имеют меньшую размерность. Вход с низкой размерностью означает, что тензоры теперь требуют сравнительно меньше памяти и вычислительных ресурсов, но наличие тензоров с низкой размерностью также может привести к снижению точности. Фильтрация тензора более низкой размерности может не дать всей полезной информации. Однако слой расширения позволяет решить эту проблему, расширяя входные данные, подаваемые тензорами перед этапом фильтрации. Полная архитектура MobileNet V2 состоит из 17 строительных блоков, за которыми следуют регулярная свертка  $1 \times 1$ , глобальный средний уровень объединения и уровень классификации [3–6].

Для исследования эффективности были сняты видеоролики, воссоздающие различные ситуации на дороге, с которыми мог бы столкнуться реализованный алгоритм. Съемка происходила на камеру мобильного телефона Xiaomi Redmi 8Pro при качестве 720p и 30FPS. Далее снятый видеоматериал был обработан с использованием реализованного алгоритма для распознавания пешеходов. В качестве результата работы алгоритма были получены данные о надежности и скорости распознавания объектов.

Надежность распознавания указана над каждым обнаруженным объектом в процентном соотношении. Скорость распознавания объектов составила 43 мс, т.е. 23–24 кадра в секунду. Это говорит о способности данного алгоритма работать в режиме реального времени.

#### Точность обнаружения пешеходов в зависимости от разрешения фигур

Первое что было исследовано, это то, как будет меняться точность распознавания при изменении расстояния до пешеходов. Чем дальше пешеход, тем меньше его разрешение. Так, в статическом положении, применив фронтальную и профильную съемку на расстоянии пять метров (рис. 3), фигуры людей имеют размеры  $114 \times 452$  пикселей, фигура слева, и  $153 \times 503$  пикселей, фигура справа, при фронтальной, а также  $115 \times 452$  пикселей, фигура слева, и  $82 \times 458$  пикселей, фигура справа – при профильной.

В таких условиях модель MobileNet V2 хорошо распознает людей при фронтальной съемке, точность распознавания фигуры слева 95,4%, а фигуры справа – 97,9% при небольшом варьировании. Для профильной съемки точность алгоритма составила 98,3% для фигуры слева и 91,2% для фигуры справа.

Далее расстояние постепенно увеличивалось, а разрешение фигуры уменьшалось. Так, на рис. 4 изображено обнаружение пешехода моделью MobileNet V2 на расстоянии 20 и 30 м.

Разрешение фигуры при 25 м равно  $20 \times 67$  пикселей, а при 30 м –  $18 \times 55$  пикселей. Точность распознавания для 25 м равна 71,9%. На расстоянии 30 м модель MobileNet V2 не способна распознать пешехода.

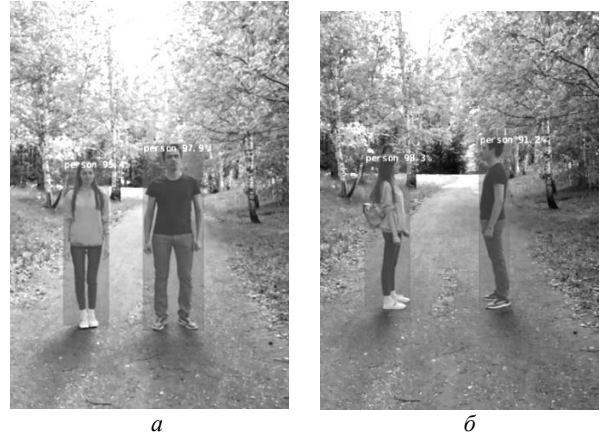


Рис. 3. Обнаружение пешеходов в статическом положении на расстоянии пяти метров при фронтальной (а), профильной съемке (б)

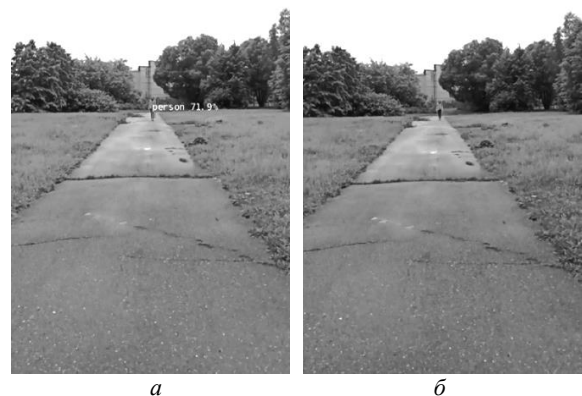


Рис. 4. Обнаружение пешеходов при увеличении расстояния до 25 м – а; 30 м – б

#### Точность обнаружения пешеходов в зависимости от частичного перекрытия фигур

Распознавание перекрытых фигур – это проблема, которая до сих пор актуальна. Существуют целые наборы данных, состоящие из различных частей тела. В ходе данной работы было исследовано, как реализованный алгоритм справляется с решением проблем такого рода.

Для исследования были сняты видеоролики с пересекающимися пешеходами на различном расстоянии. Так, при пересечении на дистанции 5 м (рис. 5) модель справилась со своей задачей.



Рис. 5. Обнаружение пешеходов при пересечении на расстоянии 5 м

Точность модели MobileNet V2 в данном случае для перекрывающего равна 97,8%, а для перекрываемого – 87,5%, что является хорошим результатом.

Из полученных результатов видно, что точность распознавания перекрывающих пешеходов выше перекрываемых.

Далее перед алгоритмами встает задача распознавания пешеходов при пересечении на расстоянии, увеличенном до 10 м (рис. 6).



Рис. 6. Обнаружение пешеходов при пересечении на расстоянии 10 м

С задачей распознавания пересекающихся пешеходов на расстоянии 10 м модель не справилась.

**Точность обнаружения пешеходов в зависимости от изменения яркости кадра**

Среди прочего требуется и исследование алгоритма при различном освещении. Для изучения, как алгоритм будет реагировать на такие изменения, были отсняты видеоролики в позднее время суток. Так, на рис. 7 можно сравнить точность распознавания модели MobileNet V2 при дневной и вечерней съемке.

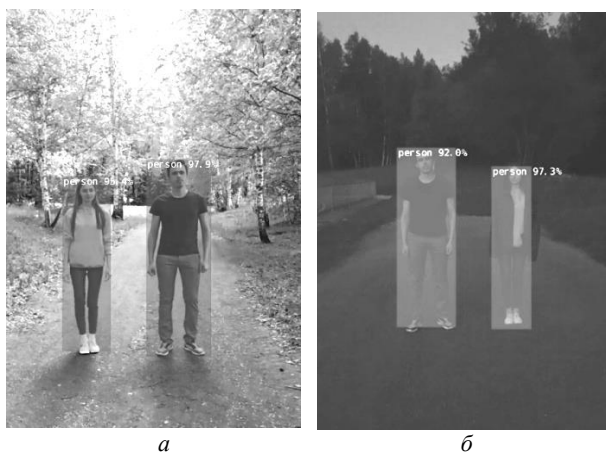


Рис. 7. Распознавание пешеходов на расстоянии 5 м при дневной съемке (а), вечерней съемке (б)

Точность при таких изменениях меняется незначительно, и на расстоянии 5 м алгоритм работает практически идентично для дня и вечера. Численные результаты точности распознавания для фигуры слева 92%, а для фигуры справа 97,3% при незначительном варьировании.

На рис. 8 приведены гистограммы по яркости исследуемых кадров.

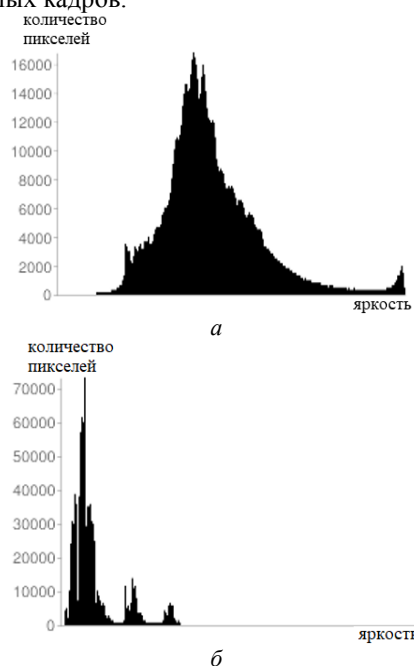


Рис. 8. Гистограммы по яркости для изображения: дневного – а; вечернего – б

Далее последовало увеличение расстояния до 10 и 15 м. На рис. 9 изображены результаты модели MobileNet V2.



Рис. 9. Обнаружение пешехода в условиях малой освещенности на расстоянии 10 м – а; 15 м – б

Из полученных результатов видно, что точность распознавания на дистанции в 10 м существенно снижается и равна 74,3% при варьировании от 70 до 80% в среднем. На расстоянии в 15 м модель не способна распознать пешехода, вместо этого происходило ложное обнаружение автомобиля.

Из полученных данных можно сделать вывод, что при дистанции до 10 м в ночное время суток алгоритм способен хорошо распознавать пешеходов. Однако при увеличении дистанции до 15 м пешеход становится более трудно различимым, и модель не справилась с поставленной задачей.



### Точность обнаружения перебегающих дорогу пешеходов

Почти 80% дорожно-транспортных происшествий с наездом на пешеходов происходит вне пешеходного перехода. Поэтому целесообразно проверить алгоритм на способность распознавания перебегающего пешехода. На рис. 10 изображен перебегающий пешеход на расстоянии 5 и 10 м, обнаруженный моделью MobileNet V2.

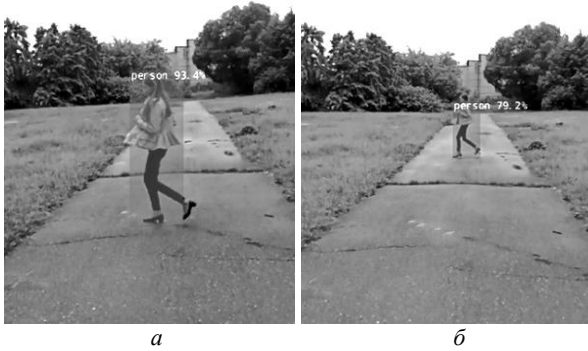


Рис. 10. Распознавание перебегающего пешехода на дистанции, равной 5 м – а; 10 м – б

На расстоянии 5 м модель MobileNet V2 хорошо обнаруживает перебегающего пешехода. Процесс распознавания бесперебоен, а точность распознавания достаточно высока. На рис. 11 изображен график, на котором покадрово показана точность распознавания объекта, находящегося в движении.

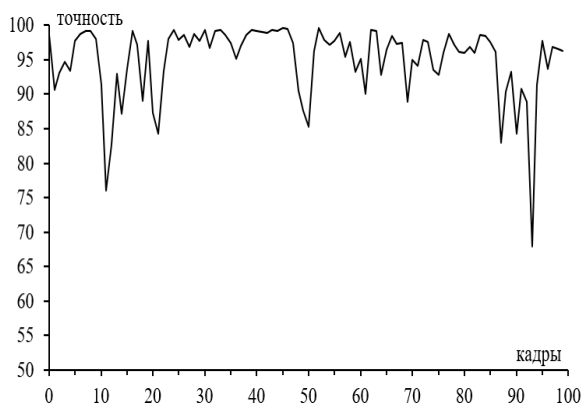


Рис. 11. График точности распознавания перебегающего пешехода на расстоянии 5 м

Как видно из графика, модель MobileNet V2 достаточно хорошо справляется с обнаружением перебегающего пешехода на дистанции, равной 5 м, точность редко опускается ниже 85%.

На рис. 12 изображен график распознавания перебегающего пешехода на расстоянии 10 м.

С увеличением расстояния, как видно из графиков, точность распознавания становится хуже. На расстоянии в 10 м имеется сильный разброс точности, а на некоторых кадрах точность опустилась ниже порогового значения в 50%.

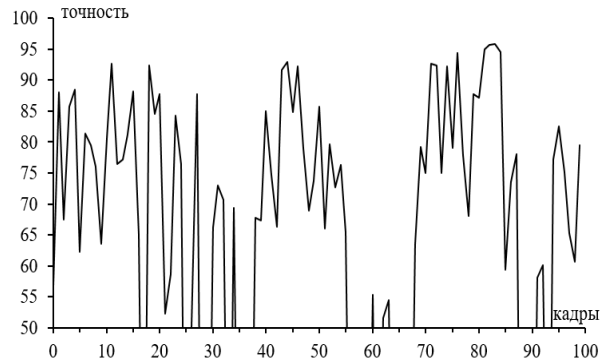


Рис. 12. График точности распознавания перебегающего пешехода на расстоянии 10 м

### Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы. Расстояние до объекта играет немаловажное значение, с его увеличением разрешение фигуры пешехода уменьшается настолько, что на дистанции в 30 м алгоритм не способен распознать пешехода.

С распознаванием перекрываемого пешехода алгоритм справляется на дистанции 5 м, но с увеличением дистанции до 10 м испытывает серьезные проблемы.

Алгоритм был проверен на способность работать в условиях низкой освещенности. На малых расстояниях он показал хорошие результаты, но с увеличением дистанции алгоритм быстро теряет точность распознавания. На расстоянии 15 м пешеход оставался нераспознанным, а также случалось ложное распознавание.

Исследование работы алгоритма для перебегающих пешеходов показало, что на расстоянии в 5 м алгоритм имеет высокую точность. С увеличением расстояния до 10 м точность распознавания стала весьма изменчива.

В заключение можно сказать, что MobileNet V2 является перспективной моделью, она сочетает достаточно высокую точность и быстродействие. Однако стоит подчеркнуть, что данная модель пока не готова для применения в беспилотном автомобиле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

### Литература

1. Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: учеб. пособие / А.В. Боресков, А.А. Харламов и др.; предисл. В.А. Садовничий. – М.: МГУ, 2012. – 336 с.
2. NVIDIA Corporation. Jetson Nano Developer Kit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit> (дата обращения: 21.08.2021).
3. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks / M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L. Chen // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – USA, Salt Lake City, 2018. – P. 510–520.
4. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision / C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens,

Z. Wojna // Computer Vision and Pattern Recognition. – USA, Las Vegas, 2016. – P. 31–40.

5. Пастушков А.В. Методы и алгоритмы поиска объекта на видеопотоке / А.В. Пастушков, В.Т. Калайда // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 38–42.

6. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Canada, Toronto, 2015. – P. 39–46.

**Эдель Герман Евгеньевич**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: german.edel99@gmail.com

**Капустин Вячеслав Валериевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

**Сукотнова Марина Евгеньевна**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: msukotnova@mail.ru

Г.Е. Эдель, М.Е. Сукотнова, В.В. Капустин

## Исследование алгоритма MobileNet V1 и его сравнение с MobileNet V2 на микрокомпьютере NVIDIA Jetson Nano

Исследованы точность и быстродействие модели MobileNet V1 при распознавании пешеходов в различных условиях съемки. Результаты были сопоставлены с результатами, полученными в ходе исследования модели MobileNet V2. Все исследования были выполнены на микрокомпьютере NVIDIA Jetson Nano.

**Ключевые слова:** NVIDIA Jetson Nano, MobileNet V1, MobileNet V2, распознавание пешеходов, система помощи водителю, беспилотные автомобили.

За последние несколько десятилетий исследователи компьютерного зрения приложили огромные усилия, чтобы компьютеры могли понимать мир, интерпретируя видеоданные. Одна из важнейших задач компьютерного зрения – обнаружение объектов. Среди тысяч обычных категорий объектов, человек – одна из категорий, привлекающих наибольшее внимание.

Задача надежного и точного обнаружения и локализации пешеходов на изображениях городских сцен обычно связана с безопасностью движения. Благодаря широкому применению в системах видеонаблюдения автоматизации, робототехники и интеллектуальных системах помощи при вождении, эта тема представляет большой интерес как для исследователей, так и для промышленности.

В видеонаблюдении обнаружение пешеходов помогает предоставить основную информацию для подсчета людей, распознавания событий и мониторинга толпы. Для интеллектуальных систем помощи водителю обнаружение пешеходов является важной частью системы, позволяющей распознавать объекты в окружающей среде. Интеллектуальные системы помощи водителю считаются наиболее сложной задачей для обнаружения пешеходов. Такая система помощи водителю визуально обращается к окружающей среде, делая снимки с помощью движущейся камеры, установленной на автомобиле в городских условиях. В большинстве случаев изображения имеют довольно сложный фон по сравнению с изображениями, сделанными при видеонаблюдении, которые обычно статичны и не имеют постоянного изменения фона [1, 2].

### Набор для разработчиков NVIDIA Jetson Nano

Этот комплект (см. с. 237, рис. 1) состоит из наномодуля Jetson и несущей платы.

NVIDIA Jetson Nano был специально создан для приложений искусственного интеллекта, таких как компьютерное зрение, сегментация и обработка речи. Он поддерживает параллельные вычисления нейронных сетей. Модуль Jetson Nano основан на системе NVIDIA Tegra X1 Series Systemon – Chip (SoC). Этот SoC состоит из четырехъядерного процессора ARM Cortex A-57 MPCore с тактовой частотой 1,43 ГГц, графического процессора на архитектуре Maxwell со 128 ядрами CUDA, работающими с максимальной

частотой, равной 921 МГц. Его производительность составляет 472 GFLOPS при FP16 точности. Кроме того, в него встроено 4 ГБ 64-разрядной памяти LPDDR4 с рабочей частотой 1600 МГц и пиковой пропускной способностью 25,6 ГБ/с. В нем доступно несколько интерфейсов связи, включая GPIO, I2C, I2S, SPI и UART. Наномодуль подключается к несущей плате через разъем SO-DIMM.

Основываясь на информации, представленной в [3], существует два возможных варианта питания. Первый вариант использует мощность 5 В и ток 2 А через разъем micro USB. Вторым, с разъемом barrel jack, использует то же напряжение, но способен подавать более высокий ток до 4 А. Его следует использовать, когда периферийные устройства потребляют больше тока, чем 2 А. В работе используется источник питания на 4 А.

Плата-носитель обеспечивает доступ к периферии, слоты расширения и порты. Она включает в себя видеовыходы HDMI и DP, гигабитный Ethernet, четыре слота USB 3.0 типа A, слот M2 Key E для Wi-Fi, PCIe (x1), USB 2.0 или I2C. Также имеется слот для последовательного интерфейса камеры (CSI) MIPI и 40-контактный разъем расширения. Пины делятся на две категории, контакты питания и сигнальные контакты. Есть два вывода на 3,3 В и два на 5 В. Также возможно запитать комплект через контакты 5 В. Сигнальные контакты используют 3,3 В. В зависимости от тока блока питания несущая плата потребляет 0,5 Вт при 2 А и 1,25 Вт при 4 А без подключенных периферийных устройств.

### Модель MobileNet V1

Современные архитектуры довольно объемны по глубине, поэтому требуют значительного объема памяти и времени вывода. Кроме того, большинству CNN нужны высококачественные графические устройства для их обучения и вывода. По мере того как сеть становится все глубже, она требует все больше памяти и вычислений, ограничивая их работу на еще меньшем количестве устройств. Группа исследователей из Google предложила MobileNet V1, семейство архитектур. Авторы утверждают, что точность MobileNet V1 сравнима с VGG16, хотя она в 32 раза меньше, чем VGG16. Основная идея MobileNet V1 заключается в том, что она использует разделяемую по глубине свертку для построения довольно небольших глубоких нейронных сетей с низкой задерж-

кой. В стандартном CNN все сверточные слои развертывают регулярную свертку. Регулярная свертка означает фильтрацию всех входных каналов и объединение их в один выходной канал за один шаг. Однако в архитектуре MobileNet V1 первый слой по-прежнему использует стандартную свертку, в то время как все слои используют разделяемую по глубине свертку.

Разделимая по глубине свертка делится на две различные операции свертки: глубокую свертку и точечную свертку. В отличие от обычных CNN, MobileNet фильтрует входные каналы в глубокой свертке, а затем объединяет их на шаге точечной свертки [4–7].

Процесс факторизации, описанный выше, позволяет существенно сократить вычисления и размер модели. Полная сеть MobileNet V1 имеет 30 уровней. Хотя размер MobileNet V1 довольно мал по сравнению с другими глубокими сетями, его можно уменьшить, настроив гиперпараметры, такие как множитель ширины и множитель разрешения. Настройка гиперпараметров делает сети меньше и быстрее, но за счет точности прогнозирования. На рис. 1 изображена архитектура MobileNet V1.

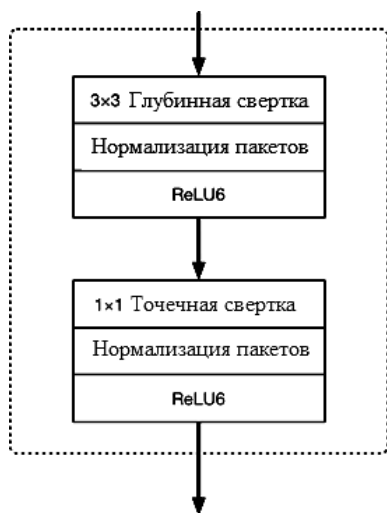


Рис. 1. Блок-схема MobileNet V1

Тестирование реализованного алгоритма проводилось на заранее снятых видеороликах. На видео были запечатлены различные дорожные ситуации, с которыми мог бы столкнуться алгоритм, будучи установленным на автомобиль. Весь видеоматериал был снят на камеру мобильного телефона Xiaomi Redmi 8Pro при качестве 720p и 30FPS. Далее ко всем видеороликам был применен реализованный алгоритм. Впоследствии имеем ряд видеороликов с обнаруженными или нет пешеходами. Над каждым обнаруженным пешеходом имеется процент надежности распознавания. Вычислительной мощности микрокомпьютера NVIDIA Jetson Nano достаточно для того, чтобы обеспечить скорость распознавания объектов около 36 мс или, иначе говоря, 27–28 кадров в секунду. Это означает, что данный алгоритм способен работать в режиме реального времени [5–9].

**Точность обнаружения пешеходов в зависимости от разрешения фигуры**

Исследовано, как расстояние влияет на точность распознавания. Разрешение фигуры с увеличением расстояния неуклонно уменьшается. Исследование проводилось путем съемки непосредственного отдаления пешеходов от камеры. Данные, на которые стоит обратить внимание, – это разрешение, точность и расстояние.

В неподвижном положении, применив фронтальную и профильную съемку на расстоянии пять метров (см. с. 238, рис. 3), фигуры людей имеют размеры 114×452, фигура слева, и 153×503, фигура справа, при фронтальной, а также 115×452, фигура слева, и 82×458, фигура справа, – при профильной.

На такой дистанции и при таком разрешении модель MobileNet V1 достоверно распознает пешеходов (точность распознавания близка к 100%).

После этого дистанция постепенно увеличивалась и точность обнаружения пешехода моделью MobileNet V1 на расстоянии 25 и 30 м менялась (см. стр. 238, рис. 4).

Разрешение фигуры при 25 м равно 20×67, а при 30 м – 18×55. Точность распознавания для 25 м равна 77,2%. На дистанции, равной 30 м, модель MobileNet V1 оказалась не в состоянии обнаружить пешехода. Ниже в табл. 1 приведены данные как для алгоритма с использованием MobileNet V1, так и для ранее исследуемой MobileNet V2.

Таблица 1  
Сравнительная таблица двух моделей

Съемка на дистанции	Модель	
	MobileNet V1, %	MobileNet V2, %
Фронтальная, 5 м	97,6–97,5	97,9% – 95,4%
Профильная, 5 м	99,1–97,1	98,3–91,2
Фронтальная, 25 м	77,2	71,9
Фронтальная, 30 м	–	–

Из табл. 1 заметно, что модель MobileNet V1 оказалась чуть более точной, нежели ее старшая версия.

**Точность обнаружения пешеходов в зависимости от частичного перекрытия фигур**

Проблема распознавания перекрывающихся фигур не нова, и для ее решения созданы отдельные наборы данных с изображениями различных частей тела. Далее проверено насколько хорошо предлагаемый алгоритм способен распознавать пересекающихся пешеходов.

Использовались видеоролики с пересекающимися пешеходами на различной дистанции. Так, при пересечении на дистанции 5 м (см. с. 238, рис. 5) модель справилась со своей задачей.

В данном случае точность распознавания модели MobileNet V1 для перекрывающегося равна 95,5%, а для перекрываемого – 82,3%, что является вполне приемлемым результатом.

Очевидно из полученных результатов, что точность распознавания перекрывающихся пешеходов ниже перекрывающихся.

Впоследствии алгоритм был проверен также на способность распознавания при пересечении на расстоянии, увеличенном до 10 м (см. с. 239, рис. 6).

Выяснилось, что модель MobileNet V1 испытывает сложности с распознаванием обоих пешеходов уже на дистанции, равной 10 м. Эти и данные полученные в результате исследования MobileNet V2, приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Сравнительная таблица двух моделей

Съемка на дистанции	Модель	
	MobileNet V1, %	MobileNet V2, %
Пересечение, 5 м	95,5–82,3	97,8–87,5
Пересечение, 10 м	69,8	82,6

С распознаванием пересекающихся пешеходов MobileNet V2 справляется лучше, чем MobileNet V1, и обеспечивает более высокий процент точности для перекрывающегося пешехода на расстоянии 10 м.

#### Точность обнаружения пешеходов в зависимости от изменения яркости кадра

Немаловажную роль играет также освещение. Реализованный алгоритм был протестирован на видеороликах, снятых в условиях низкой освещенности. Можно сравнить точность распознавания модели MobileNet V1 при дневной и вечерней съемке (см. с. 239, рис. 7).

Можно заметить, что точность распознавания как для дня, так и для ночи на дистанции, равной 5 м, незначительно отличается. Но все же при вечерней съемке точность оказалась ниже для обеих фигур. Численные результаты для фигуры слева – 90,7%, а для фигуры справа – 86,8% при незначительном варьировании.

Далее дистанция до пешеходов была постепенно увеличена до 10 и 15 м. Изображены результаты работы модели MobileNet V1 (см. с. 239, рис. 9).

С увеличением расстояния точность распознавания существенно снижается и не имеет стабильного характера. Алгоритм справился с обнаружением пешехода на дистанции в 10 м. Процент распознавания равен 82,9% и изменяется от 70 до 90%. При расстоянии, равном 15 м, MobileNet V1 не смогла распознать человека. Полученные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Сравнительная таблица двух моделей

Съемка вечерняя на дистанции, м	Модель	
	MobileNet V1, %	MobileNet V2, %
5	90,7–86,8	97,3–92
10	82,9	74,3
15	–	–

Из табл. 3 видно, что MobileNet V1 в темноте на дистанции до 10 м справляется лучше, чем новая версия.

#### Точность обнаружения перебегающих дорогу пешеходов

По статистике огромное количество дорожно-транспортных происшествий с наездом на пешеходов случаются при перебежании дороги в неполюженном

месте. Вследствие этого алгоритм был протестирован на способность распознавания перебегающего человека. Изображен перебегающий пешеход на расстоянии 5 и 10 м, обнаруженный моделью MobileNet V1 (см. с. 240, рис. 10).

Результатом такого тестирования стало бесперебойное распознавание с весьма высокой точностью на дистанции, равной 5 м. Покадровая точность находящегося в движении человека при дистанции, равной 5 м, приведена на рис. 2 (MobileNet V1).

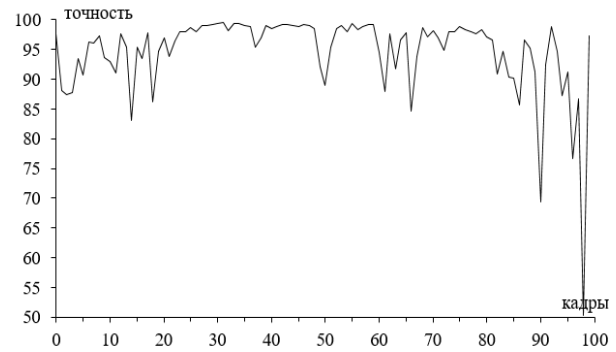


Рис. 2. График точности распознавания перебегающего пешехода на расстоянии 5 м модели MobileNet V1

По общей динамике графика видно, что реализованный алгоритм хорошо справляется с распознаванием перебегающего человека на расстоянии 5 м. Точность распознавания редко опускалась ниже 85%.

На рис. 3 изображен график точности MobileNet V1 и MobileNet V2 для одного и того же видеоролика.

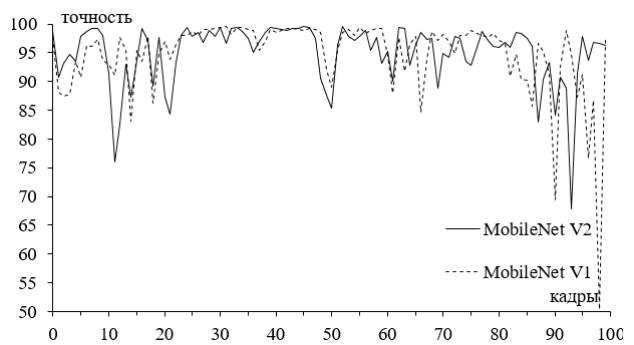


Рис. 3. График точности перебегающего пешехода на дистанции 5 м для моделей MobileNet V1 и MobileNet V2

Покадровая точность находящегося в движении человека при дистанции, равной 10 м приведена на рисунке в предыдущей статье (см. с. 240, рис. 12).

Увеличение дистанции значительно сказалось как на точности, так и на стабильности с общей динамикой графика. Точность распознавания заметно снизилась, в нескольких местах она и вовсе оказалась ниже порогового значения, равного 50%. Можно сделать вывод, что дистанция играет большую роль при распознавании перебегающего дорогу человека.

Также на рис. 4 можно сравнить график покадровой точности находящегося в движении человека при дистанции, равной 10 м (MobileNet V1 и MobileNet V2).

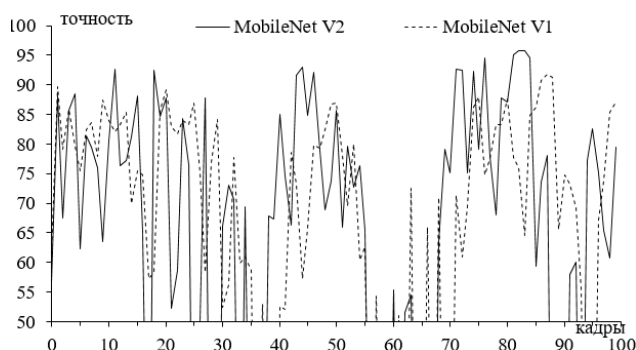


Рис. 4. График точности на дистанции 10 м для моделей MobileNet V1 и MobileNet V2

### Заключение

В завершение исследования реализованного алгоритма можно прийти к следующим выводам.

Разрешение изображения фигуры существенно сказывается на точности распознавания. С увеличением дистанции до 30 м алгоритм не способен распознать пешехода. Модель MobileNet V1 продемонстрировала несколько лучший результат точности сразу на нескольких дистанциях.

MobileNet V1 неплохо справляется с распознаванием перекрываемого пешехода на расстоянии 5 м, но испытывает большие трудности с увеличением дистанции так же, как MobileNet V2.

Модели вполне способны работать при низкой освещенности. Однако в таких условиях дистанция, на которой алгоритм способен распознать человека, существенно снижается. MobileNet V1 оказалась менее чувствительна к освещенности, а также не было замечено ложных срабатываний, которые наблюдались при использовании MobileNet V2.

Результаты, полученные при изучении перебегающего пешехода, показали, что модель хорошо распознает бегущего человека на дистанции, равной 5 м. При увеличении дистанции до 10 м кадровый график точности теряет свой относительно стабильный характер. В целом результаты двух моделей весьма схожи.

Подводя итог, можно сказать, что модель MobileNet V1 по-прежнему актуальна для практического использования. Она практически ни в чем не уступает своей новой версии, особенно в быстродействии. Модель является весьма перспективной к дальнейшим доработкам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

### Литература

1. Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: учеб. пособие / А.В. Боресков, А.А. Харламов и др.; предисл.: В.А. Садовничий. – М.: МГУ, 2012. – 336 с.
2. Капустин В.В., Мовчан А.К., Зайцева Е.В., Курячий М.И. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях // Сетевой электронный журнал «Транспортные системы и технологии». – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 068–083.
3. Комплект разработчика NVIDIA Jetson Nano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>. (дата обращения: 21.08.2021).
4. Мобильные сети: эффективные сверточные нейронные сети для приложений мобильного зрения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1704.04861> (дата обращения: 21.08.2021).
5. Rastegari M. Imagenet classification using binary convolutional neural networks / M. Rastegari, V. Ordonez, J. Redmon, A. Farhadi // European Conference on Computer Vision. 2016. – P. 525–542.
6. MobileNet V2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks / M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L. Chen // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – USA, Salt Lake City, 2018. – P. 510–520.
7. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision / C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, Z. Wojna // Computer Vision and Pattern Recognition. – USA, Las Vegas, 2016. – P. 31–40.
8. Пастушков А.В. Методы и алгоритмы поиска объекта на видеопотоке / А.В. Пастушков, В.Т. Калайда // Сб. науч. трудов: SWorld. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 38–42.
9. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Canada, Toronto, 2015. – P. 39–46.

**Эдель Герман Евгеньевич**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [german.edel99@gmail.com](mailto:german.edel99@gmail.com)

**Капустин Вячеслав Валериевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [peregnum@mail.ru](mailto:peregnum@mail.ru)

**Сукотнова Марина Евгеньевна**  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: [msukotnova@mail.ru](mailto:msukotnova@mail.ru)

А.В. Яценко, Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко

## Космические снимки и информационные технологии для дистанционного зондирования Земли

Рассмотрены основные способы дистанционного зондирования Земли. Космические снимки являются оптимальным средством зондирования Земли, отличаются мощным информационным ресурсом, широкомасштабным охватом территории и доступностью. Представлен пример работы с космическими снимками в системе ArcGis.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, беспилотные летающие аппараты, космические снимки, спутниковые данные, геоинформационные системы, растительный покров, нефтегазовое месторождение.

Дистанционное исследование – это процесс сбора информации об объекте, местности или явлении без конкретного контакта с ним. Дистанционное исследование охватывает все варианты неконтактных съемок, которые производятся со всех типов замерных платформ: невесомые и космические аппараты (беспилотные летательные аппараты (БПЛА), вертолеты, галактические корабли, спутники и т.д.), корабли и подводные лодки наземного базирования [1].

### Варианты дистанционного зондирования Земли

Рассмотрим самые распространенные варианты авиатехники: БПЛА, вертолеты и космические снимки. Дроны показали себя как действенный инструмент, который произвел революцию в геоинформационных системах. Бортовое оснащение дронов имеет возможность коллекционировать всевозможные данные, применяя видеокамеры и другие датчики. Совместно с маркерами и географической привязкой на земле такие устройства позволяют сформировать бесконечно отчетливые цифровые карты с допущением до 5 см на пиксель [2]. К превосходству применения БПЛА относятся: расчетность времени для анализа местностей; повышенная эффективность, более четкая информация и исключение человеческих факторов (человек менее внимателен, чем внятно настроенная программа БПЛА). Изъянами потребления дронов считаются: зависимость от атмосферных условий и времени дня и ночи съемок; выставляются высокие запросы к оборудованию и пилотам; перед использованием устройства необходимо получить разрешение на полет [3, 4].

Воздушные полеты осуществляются с воздушных судов (самолетов, вертолетов), оснащенных специальным оборудованием. Полеты производятся на малых, средних и больших высотах с поддержанием постоянной высоты по показаниям барометрического высотомера. Запрещены полеты в ночное время суток в гористую местность, разрешается выходить из воздушного судна для детального наблюдения за объектами на высоте только 10 м над препятствием [5]. Преимущества применения аэрофотосъемки заключаются в том, что аэроплан имеет возможность летать ниже облаков, в соответствии с этим снимки будут сделаны в пасмурные периоды и есть возможность повторить полет на грядущий день. Снимки могут быть получены с допущением до нескольких санти-

метров (имеется зависимое положение от высоты полета), промежуток времени поставки изображений зависит от доступности аэроплана и от летней погоды (с июня по август). Минусы – стоимость, ценность полета, операция планирования и выполнения съемки трудоемка и занимает большое количество времени, необходимо оцифровывать и корректировать снимки, записанные на цифровой носитель.

Спутник Landsat 1 был запущен в 1972 г., он развернул космические снимки (КС), которые используются до сих пор. Снимки Landsat 1 формировали изображения четверех спектральных диапазонов и величиной пикселя 80 м. В настоящий момент запущен Landsat 8, который дает возможность формировать описание земной сферы с предельным допущением 15 м [6]. Эксплуатация КС имеет то преимущество, что материалы фиксируются в цифровой форме, т.е., их обрабатывать не нужно; для проведения космической съемки никакого соглашения не требуется; полученные изображения находятся в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Несовершенство галактических снимков включают в себя: пасмурность (является внушительной проблемой) и средний промежуток времени поставки изображений составляет от 7 дней до месяца. Кроме беспрепятственно распространяемых спутниковых фотоснимков Landsat 8, возможно применять данные спектрорадиометра MODIS американских спутников Terra и Aqua с независимым доступом к сведениям. Информационные карты MODIS включают в себя 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в заметном, прилегающем, среднем и температурном инфракрасном диапазонах [7].

Таким образом, спутниковые изображения владеют предельным охватом, являются массивным источником информации в цифровом формате и частично доступны широкому кругу изыскателей.

### Геоинформационная система ArcGis

Геоинформационная система (ГИС) ArcGis – это комплексная система, которая позволяет коллекционировать, управлять, анализировать, обмениваться и распространять географическую информацию [8].

В Институте химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН) сформирован банк направленных на определенную тематику продуктов MODIS для нефтедобывающего района Западной Сибири за период 2000–2020 гг.

Посредством ArcGis осуществляется географическая привязка КС, цифровая обработка информации, классификация объектов, пространственный и статистический разбор данных.

Предположим пример использования КС и ГИС в сфере добычи нефти. По сведениям общества «Совместная инициатива по нефтяной статистике» (JODI), Российская Федерация систематически входит в перечень фаворитов нефтедобычи [9]. Процесс добычи и транспортировки углеводородов оказывает значительное воздействие на все составляющие окружающей среды. Освоение свежих залежей, уничтожение сопутствующего водонефтяного газа, разливы «земляного масла» являются обязательными негативными причинами, содействующими усилению отрицательных тенденций природоохранной ситуации. Нефтегазовый комплекс кардинально меняет литосферу, гидросферу, атмосферу, а также почвенный покров и естественную биоту. Необходимой задачей считается разработка методики численного рейтинга самочувствия вегетативного полового и анализа совокупной реакции экосистем на антропогенное влияние [10].

Для изучения процесса изменений состояния вегетативного покрова территорий нефтедобывающих первоначальными материалами служили космические информационные карты MODIS (продукт MOD13Q1), показывающие точечные шестнадцатидневные эпизоды с пространственным допущением 250 м. Разбор принадлежности вегетационного полового усвоенных областей за продолжительный срок включает числовой ряд значений вегетационного индекса NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), который рассчитывается по формуле [11]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{nir}$  – спектральная яркость поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне;  $\rho_{red}$  – в красном диапазоне.

При значениях индекса NDVI невозможно рассматривать среднемесячные температуры и атмосферное давление при рассмотрении тренда развития растительности, в отличие от EVI (Enhanced Vegetation Index), что является колоссальным различием и ведет к дальнейшему рассмотрению вегетационного индекса EVI [12].

Показатель значений индекса EVI рассчитываются по нижеследующей формуле:

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + C_1) - (\rho_{red} - C_2)(\rho_{blue} + L)} (1 + L), \quad (2)$$

где  $\rho_{blue}$  – спектральная яркость поверхности в синем диапазоне;  $L$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы;  $C_1, C_2$  – коэффициенты аэрозольной устойчивости, использующие синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале.

Размах значений показателя EVI от минус единицы до единицы; для зеленоватой растительности показатель приобретает значения от 0,2 до 0,8 [13].

#### Предмет исследования

В представленной работе рассматриваются значения индекса EVI для трех месторождений углево-

дородов в Ямало-Ненецком автономном округе: Восточно-Таркосалинского, Тарасовского, Комсомольского.

С помощью ГИС ArcGis 10.8 были разработаны многоугольные векториальные элементы полей и сопутствующих владений. Разбор динамики значений индекса EVI проводился на 209-й календарный день года (точнее, 28 июля), т.е. в результате шестнадцатидневного перемещения спутника с 13 по 28 июля за каждый год. Показатель EVI рассчитывался с 2013 по 2020 г. [14].

Средние подсчитанные показатели растительного индекса EVI за восьмилетний период для каждого предмета исследования представлены в табл. 1. Из данных в таблице можем сделать вывод, что со временем фиксируется положительный исход восстановления растительного полового. Наблюдается рост вегетационного индекса с 0,3774 до 0,3794, в 2013 и в 2019 гг. соответственно для Восточно-Таркосалинского месторождения. На Комсомольском месторождении увеличение на 0,025 (с 0,3454 до 0,3479), на Тарасовском – 0,3380 против 0,3392.

Таблица 1  
Значения вегетационного индекса EVI

Год	Восточно-Таркосалинское	Тарасовское	Комсомольское
2013	0,3774	0,3380	0,3454
2014	0,3476	0,3095	0,3168
2015	0,3709	0,3328	0,3277
2016	0,3546	0,3223	0,3320
2017	0,3523	0,3265	0,3307
2018	0,3444	0,3075	0,2856
2019	0,3794	0,3322	0,3429
2020	0,3544	0,3392	0,3479

На рис. 1 представлен процесс изменения усредненных значений показателя EVI. Подсчет средних величин для всех областей проводился через функцию «Зональная статистика» (Zonal Statistics) ГИС ArcGis 10.8.

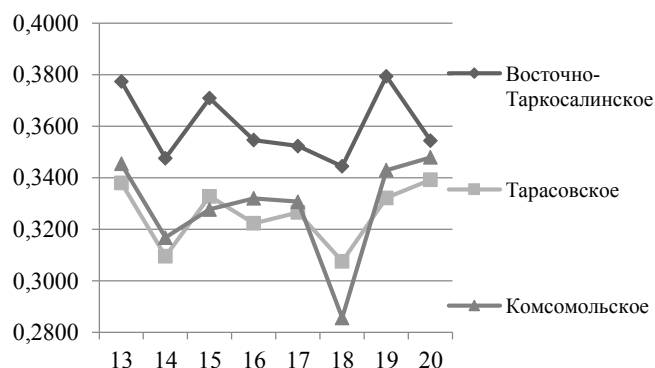


Рис. 1. Динамика показаний EVI

Восточно-Таркосалинская углеводородная территория является наивысшей по показаниям вегетационного индекса в отношении трех рассматриваемых объектов (см. рис. 1). Вторая территория – Тарасовская и третья – Комсомольская. Максимальным



показателем из всех является 0,3794, а минимальным – 0,2856 (см. табл. 1). Такое выразительное отличие Восточно-Таркосалинского месторождения от двух других месторождений объясняется расположением и особенностями рельефа: земля расположена на юго-востоке от г. Салехарда и находится в пределах лесной равнинной области с елово-лиственными и сосновыми лесами [15].

Наиболее низкие значения индекса EVI соответствуют всем месторождениям в 2018 г., в общем, напрашивается вывод о положительных трендах увеличения значения индекса EVI данных месторождений за восьмилетний период мониторинговых зондирований.

В 2013 г. прослеживаются сверхвысокие значения EVI у представленных нефтедобывающих территорий, а в 2018 г., наоборот, наблюдается резкий упадок значений вегетационного индекса. Обоснование по данным ситуациям лежит в метеорологических параметрах в конкретных областях, по данным метеостанции Пудино, находящейся в относительной близости от предметов исследования, по сравнению с другими метеостанциями (табл. 2).

Таблица 2

**Метеорологические параметры [14]**

Год	Среднемесячная температура, °С	Атмосферные осадки, мм	Влажность воздуха, %
2013	21,3	38,9	71,3
2014	16,7	83,6	76,1
2015	17,8	49,5	70,0
2016	19,0	189,7	76,8
2017	16,7	132,2	75,5
2018	16,4	40,5	75,5
2019	18,7	73,5	72,0
2020	16,8	75,6	72,4

В соответствии с этим самая большая средняя температура наблюдается в 209 календарный день 2013 г. и составляет 21,3 °С, а через пять лет этого же дня средняя температура является наименее низкой по отношению к другим данным, представленным в табл. 2, и определяется в 16,4 °С.

Воздействие температуры на значения вегетационного индекса подтверждается по результатам корреляционного анализа. Уровень корреляционной связи между показаниями EVI и среднемесячной температурой атмосферного воздуха определяется в пределах 0,27–0,51 и называется средним.

В табл. 2 представлены не только среднемесячные температуры на протяжении восьми лет, но и атмосферные осадки и влажность воздуха.

Относительная влажность воздуха накладывает более неоднозначный и сложный акцент на значения вегетационного индекса EVI. Самая слабая прямая зависимость (коэффициент корреляции составляет 0,13) установлена для Комсомольского углеводородного месторождения, а для Восточно-Таркосалинского и Тарасовского месторождений зависимость является обратной, т.е., значения коэффициента определяются в размахе от –0,25 до –0,49.

Значения параметра «атмосферные осадки» для значений индекса EVI показывают несущественную связь между собой, поэтому эти данные являются неважными для данных областей.

**Заключение**

По представленным спутниковым продуктам MODIS осуществлен подсчет вегетационного индекса EVI для трех углеводородных месторождений. Превосходство использования улучшенного индекса EVI в задачах мониторинга состояния растительности обусловлено минимизацией воздействия земли и воздушной сферы на его значения. Анализ динамики изменения частных значений EVI предоставил маленькие и большие значения индекса для исследуемых территорий, а также обнаружил тренд повышения его значений, что удостоверяет о превосходном неугнетенном состоянии растительности и улучшении природоохранной обстановки исследуемых местностей нефтедобывающих комплексов Ямало-Ненецкого автономного округа. Таким образом, можно заключить, что космические снимки подходят для дальнейшей работы в геоинформационных системах и выявления тренда развития или тренда угнетения растительных почв на нефтедобывающих комплексах различных областей.

**Литература**

1. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
2. Килби Т. Дроны с нуля / Пер. с англ. Т. Килби, Б. Килби. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 192 с.
3. Профессиональная аэросъемка и ремонт мультикоптеров [Электронный ресурс]. – URL: <https://slysky.ru> (дата обращения: 19.09.2021).
4. Российские беспилотники [Электронный ресурс]. – URL: <https://russiandrone.ru> (дата обращения: 19.09.2021).
5. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 08.06.2020).
6. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
7. Перемитина Т.О. Дистанционный мониторинг экологического состояния нефтедобывающих территорий Западной Сибири / Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – Т. 27, № 1. – С. 53–57.
8. ArcGis Resources [Электронный ресурс]. – <https://resources.arcgis.com> (дата обращения: 19.09.2021).
9. Joint Organisations Data Initiative: The JODI Oil World Database [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.jodi-data.org/oil> (дата обращения: 19.09.2021).
10. Крицук С.Г., Горный В.И., Калабин Г.В., Латыпов И.Ш. Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 228–237.
11. Gillespie T. W. et al. Мониторинг изменений NDVI в охраняемых районах Южной Калифорнии // Экологические индикаторы. – 2018. – Т. 88. – С. 485–494.
12. Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений / А.А. Лагутин, И.А. Суторихин,

В.В. Сеницын и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 01. – С. 60–66.

13. Testa S. Mondino Spatio-temporal mangrove canopy variation (2001–2016) assessed using the MODIS enhanced vegetation index (EVI) International / S. Testa, K. Soudani, L. Boschetti // Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. – Vol. 64. – P. 132–144.

14. Яценко И.Г. и др. Применение данных наземного и дистанционного исследований для оценки экологического состояния нефтегазоносных территорий Западной Сибири // Безопасность жизнедеятельности. – 2017. – № 9. – С. 45–50.

15. Тигеев А.А. Ландшафтное картографирование территории Восточно-Таркосалинского нефтегазоконденсатного месторождения // Безопасность жизнедеятельности. – 2017. – № 9. – С. 195–202.

16. Специализированные массивы для климатических исследований: выборка данных обеспечивается Web-технологией «Аисори – удаленный доступ к ЯОД-архивам» (обновляется в течение суток). – URL: <http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения: 19.09.2021).

**Яценко Анастасия Вячеславовна**

Магистр каф. ТУ ТУСУРа

Эл. почта: [nastyayashenko@mail.ru](mailto:nastyayashenko@mail.ru)

**Перемитина Татьяна Олеговна**

Канд. техн. наук, доцент каф. АОИ ТУСУРа

Эл. почта: [tatiana.o.peremitina@tusur.ru](mailto:tatiana.o.peremitina@tusur.ru)

**Яценко Ирина Германовна**

Канд. геол.-мин. наук, зав. лаб.

Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН)

Эл. почта: [sgic@ipc.tsc.ru](mailto:sgic@ipc.tsc.ru)

А.С. Захлебин, М.И. Курячий

## Комбинированный метод построения геопривязанного ортофотоплана местности по изображениям с телевизионной камеры БВС вертолетного типа

Рассмотрен комбинированный способ построения ортофотоплана местности. Одна часть ортофотоплана местности построена за счет точных координат центров фотографирования, другая часть ортофотоплана местности построена с использованием пунктов планово-высотного обоснования. Проведена оценка точности географической привязки раstra на контрольных точках, координаты которых были получены на исследуемом объекте посредством RTK-измерений.

**Ключевые слова:** дрон, БПЛА, БВС, ортофотоплан местности, аэрофотосъемка, аэрофотоснимок, цифровая модель, авиационные работы, фотограмметрическая обработка.

В настоящее время геопривязанные цифровые модели и ортофотопланы местности, построенные по аэроснимкам с беспилотных воздушных судов (БВС), имеют высокое пространственное разрешение, а также высокую точность геопространственных данных. Эти данные используются во многих сферах деятельности человека: строительство, мониторинг, сельское хозяйство, проектирование, землеустроительные, кадастровые работы [1] и т.д. Это стало возможным благодаря стремительному развитию сверхлегких БВС и устройств, которые используются на них в качестве полезной нагрузки. В зависимости от задач применяется различный тип БВС: самолетного или вертолетного типа. Для создания геопривязанного ортофотоплана местности в качестве полезной нагрузки, установленной на БВС, используется телевизионная камера [2]. В качестве навигационной системы используются GPS-приемники либо геодезические одночастотные/двухчастотные ГНСС-модули.

Геодезические ГНСС-приемники на борту БВС имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными GPS-приемниками. Они дают возможность в постобработке данных спутниковых измерений получать точные координаты центров фотографирования [3].

Таким образом, географическая привязка ортофотоплана местности может осуществляться без использования пунктов планово-высотного обоснования. Данный способ экономит значительную часть времени при проведении полевых и камеральных работ.

Недостатком данного метода является то, что требуется стабильный сигнал от созвездия спутников. В противном случае при срыве фазы несущего сигнала от спутников станет невозможна постобработка результатов спутниковых наблюдений. Точность центров фотографирования составляет около 5 м, что ставит под сомнение возможность применения на практике таких материалов. В таком случае чтобы построить ортофотоплан местности в требуемой точностью, потребуется заново провести авиационные работы в местах, где произошел сбой. Что влечет за собой большие временные и финансовые потери. Как правило, это происходит на местности, где

есть источник сильной электромагнитной помехи и БВС совершает полет на высоте до 150 м.

Предлагаемый в работе комбинированный метод построения ортофотоплана местности позволяет исключить ситуацию, когда требуется проводить авиационные работы повторно из-за срыва сигнала от спутников.

Работы проводились в одном из населенных пунктов Томской области общей площадью 700 га. В ходе подготовительных работ выяснилось, что на объекте имеются источники сильных электромагнитных помех, которые могут влиять на качество приема сигнала со спутника. В связи с этим в качестве страховочной меры было принято решение о расположении на местности пунктов планово-высотного обоснования (опознавательных знаков), которые в случае получения некачественных данных спутниковых измерений можно применить в фотограмметрической обработке и обеспечить требуемую точность конечного ортофотоплана [4, 5].

Среднее расстояние между опознавательными знаками составило 250 м. Общее количество опознавательных знаков – 103 шт. (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения опознавательных знаков на местности

Координаты опознавательных знаков были определены геодезическим ГНСС-приемником Trimble R8 в режиме RTK.

В качестве БВС использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro (рис. 2). На его борту установлена телевизионная камера с разрешением 20 мегапикселей

и механическим затвором, которая закреплена на гиростабилизирующий трехосевой подвес. Для позиционирования в пространстве и записи координат центров фотографирования используется установленный двухчастотный геодезический приемник AGNSS.

Для выполнения авиационных работ было сформировано 19 полетных заданий общей протяженностью 158 км (рис. 2).

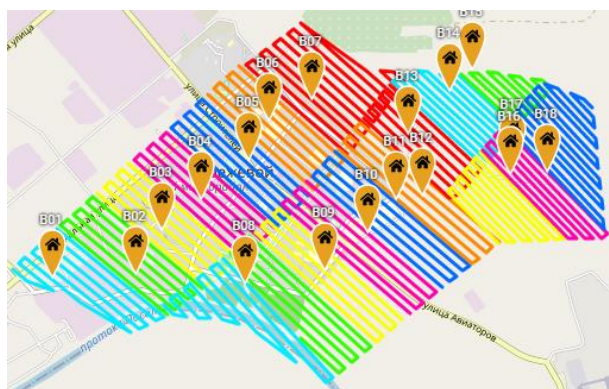


Рис. 2. Полетные задания для БВС

Основные параметры полета указаны в таблице.

Параметры полетного задания	
Параметр	Значение
Ориентация камеры	В надир
Высота полета БПЛА	110 м
Продольное перекрытие снимков	85%
Поперечное перекрытие снимков	60%
Скорость полета	9 м/с

В процессе выполнения полетных заданий был сформирован видеоряд из 12 408 аэрофотоснимков.

Расчет центров фотографирования и первичное выравнивание аэрофотоснимков по точным центрам в ПО Agisoft Metashape показали ошибку на контрольных точках до 15,5 см в плане в двух первых полетах. На рис. 3 представлен график отношения сигнал/шум для первого полета.

На частотах L1 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал / шум лежит в пределах 30–50 дБГц. Как видно из рис. 3 значения в первой половине полета опускаются до 10 дБГц и ниже. На частотах L2 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал / шум лежит в пределах 25–50. На рис. 3 значения также опускаются ниже 10 дБГц. Аналогичный график имеют данные спутниковых измерений во втором полете.

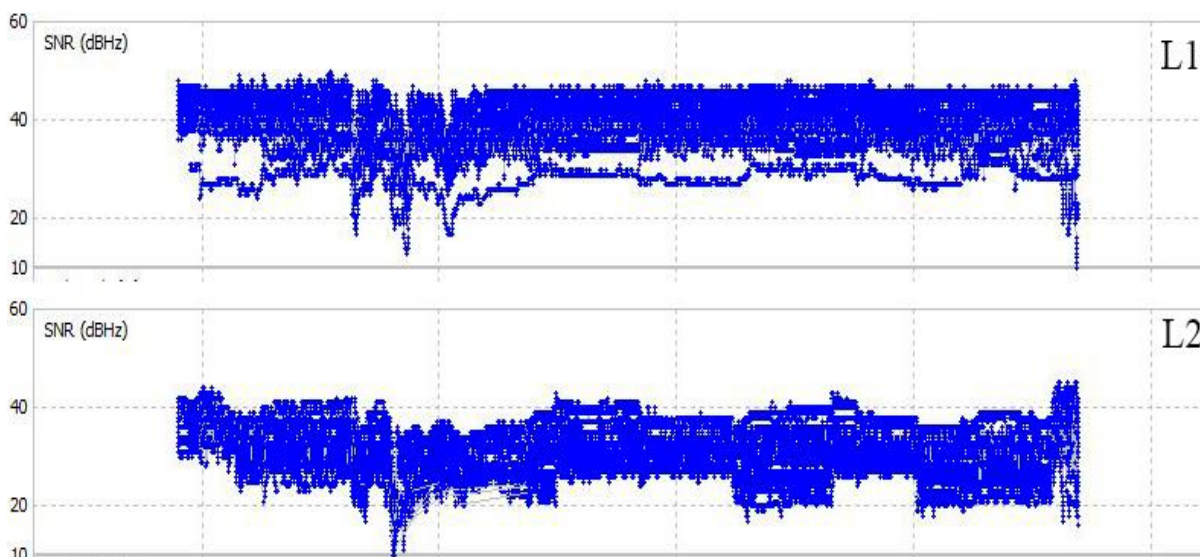


Рис. 3. График отношения сигнал / шум на частотах L1 и L2 для первого полета

В результате анализа графиков отношения сигнал / шум можно сделать вывод о том, что данные значения могли быть вызваны источником сильной электромагнитной помехи или же глушилкой GPS-сигнала. Данная версия наиболее вероятна, так как в районе полетов на данной местности располагалась стоянка большегрузного транспорта, где очень часто используются устройства для подавления сигнала со спутника.

Дальнейшая обработка происходила комбинированным методом. При этом фотограмметрическая обработка первого и второго полетов осуществлялась с использованием пунктов планово-высотного обоснования (ПВО) в качестве опорных, не учитывая координаты центров фотографирования. В оставшихся

шестнадцати полетах фотограмметрическая обработка осуществлялась по точным координатам центров фотографирования.

В результате плановая ошибка в двух первых полетах была уменьшена. Максимальное отклонение на контрольных точках составило 8 см. Среднее значение точности геопривязки конечного ортофотоплана местности в плане составило 4 см.

По результатам проведения исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение описанного метода построения ортофотоплана местности позволяет компенсировать ошибки, вызванные сильными электромагнитными помехами, либо устройствами подавления спутникового сигнала.

2. Полученный ортофотоплан местности может использоваться на практике для различных топографических работ, так как СКО по контрольным точкам не превышает 8 см, а пространственное разрешение полученного ортофотоплана местности 2,73 см/пиксель.

3. Недостатком данного метода являются большие временные затраты на полевые работы, так как требуется заложить пункты ПВО на всю исследуемую местность.

4. Также к недостатку можно и отнести тот факт, что часто пункт ПВО физически невозможно разместить на местности (густой лес). Если сбой произойдет на такой местности, полетное задание придется повторить.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

#### *Литература*

1. Баклыков М.А. Применение модифицированных дронов при проведении топографо-геодезических работ // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 2. – С. 19–21.

2. Захлебин А.С. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа / А.С. Захлебин, А. Калибеков, М.И. Курячий // Электронные средства и

системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2020. – № 1-2. – С. 187–189.

3. Завгородняя Д.В. Использование ГНСС-технологий для определения пространственного местоположения беспилотного летательного аппарата // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2017. – С. 279–282.

4. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. 19 февраля 2021 г. № 85.

5. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Утв. приказом Федеральной службой геодезии и картографии. России от 11.06.2002 г. № 84-ПР, Москва, ЦНИИГАиК, 2002.

---

#### **Захлебин Александр Сергеевич**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: aerosnimok@gmail.com

#### **Курячий Михаил Иванович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: kur@tu.tusur.ru

*Секция 19*

**ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ И ВЕЙВЛЕТ-ФРАКТАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА  
СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, канд. техн. наук*



И.А. Бойко, Е.И. Глушанков

## Модифицированный алгоритм Ньютона в системах massive MIMO с прекодированием

Целью данной работы являлось получение итерационного алгоритма прекодирования с большей скоростью сходимости и меньшей вычислительной сложностью. В данной работе рассматривается решение задачи формирования диаграммы направленности приёмных и передающих антенных систем с использованием линейного прекодирования для систем MIMO, включая прекодеры с приближенными методами инверсии матрицы, такими как итерационный алгоритм Ньютона (NI), а также предлагается вариант модифицированного алгоритма Ньютона с переменным коэффициентом масштаба. Приведено математическое описание обработки сигналов в модели downlink для систем massive MIMO, а также процедур линейного прекодирования.

**Ключевые слова:** адаптивная антенная решётка, massive MIMO, прекодирование, итерационные алгоритмы, MATLAB.

Технология massive MIMO играет важную роль в системах связи пятого поколения (5G). Однако сложность систем massive MIMO значительно возрастает при использовании большого количества антенн и радиочастотных цепей (РЧ). Для таких систем было проведено множество исследований, направленных на поиск оптимального алгоритма прекодирования с наименьшей сложностью.

Прекодирование (или предварительное кодирование) состоит в использовании на передающей стороне информации о состоянии канала связи для предварительной обработки передаваемых сигналов, т.е. для согласования сигналов с характеристиками канала [1, 2]. Если информация о состоянии канала известна точно, то осуществляется оптимальное прекодирование, если же она известна приближенно (что, как правило, имеет место на практике), то осуществляется квазиоптимальное прекодирование [3]. Прекодирование является необходимым этапом в системах massive MIMO с обратной связью, поскольку оно увеличивает пропускную способность, а также уменьшает влияние помех [4]. В massive MIMO информация о состоянии канала (channel state information – CSI) может быть оценена с помощью пилотных сигналов восходящей линии, полученных от принимаемых терминалов [5, 6].

Использование итерационных алгоритмов позволяет получить довольно точную оценку прекодирующей матрицы и избежать проблем при трудоёмкой операции обращения канальной матрицы [7].

### Модель системы

При использовании временного разделения каналов (TDD) восходящая (UL) и нисходящая (DL) линии связи работают в разных временных слотах, но в одной и той же полосе частот. На базовой станции (БС) строение прекодера DL зависит от оценки канала, которая была получена в предыдущем слоте UL. В TDD обычно предполагается взаимность каналов [8, 9]. В условиях massive MIMO TDD имеет большую производительность по сравнению с частотным разделением каналов (FDD), поскольку FDD имеет удовлетворительную производительность в условиях прямой видимости и при высоких значениях райсовского коэффициента  $v$ .

Ковариационная матрица играет существенную роль при распределении ресурсов. Ковариационная матрица представляет собой матрицу, составленную из попарных ковариаций элементов вектора входных сигналов. Во множестве работ по massive MIMO предполагается, что она идеально известна, что может привести к ошибочным выводам, поскольку размерность матрицы зависит от количества антенн и других статистических данных. Ковариационные матрицы большой размерности можно оценить с помощью выборочной ковариационной матрицы. Неопределённость CSI может быть сведена к погрешности CSI, аппроксимированной комплексным симметричным АБГШ с различной спектральной плотностью мощности, характеризующей величину соответствующей погрешности.

Пропускная способность канала зависит от CSI. В [10, 11] было показано влияние CSI на пропускную способность и энергоэффективность канала. Энергоэффективность канала сильно зависит от CSI при передаче на большие расстояния и слабо зависит при передаче на короткие расстояния, как, например, в случае модели 5G.

В модели downlink для massive MIMO имеется  $M$  передающих антенн одной БС, которые обслуживают  $N$  одиночных антенн приёмных терминалов, причём  $M \geq N$  [12, 13]. Математически комплексные усиления канала описываются канальной матрицей, где элементом матрицы является комплексное усиление пути от  $m$ -й антенны БС до  $n$ -го приёмного терминала. При TDD канальная матрица  $\mathbf{H}$  размерностью  $M \times N$  одинакова для downlink (DL) и uplink (UL) и определяется как

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $h_{MN}$  – элементы матрицы являются случайными величинами, имеющими комплексное гауссовское распределение.  $N$ -мерный вектор входных символов  $\mathbf{d} = [d_1 \dots d_N]^T$  преобразуется в  $M$ -мерный вектор сигнала на выходе антенной решётки  $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_M]^T$  в результате прекодирования:



$$\mathbf{x} = \sqrt{\rho} \mathbf{P} \mathbf{d}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{P}$  – линейная прекодирующая матрица размерности  $M \times N$ ,  $\sqrt{\rho}$  – средняя переданная мощность. Затем вектор выходного сигнала передаётся в DL через канал связи отдельно на каждый из  $N$  принимающих терминалов.

Принимаемый вектор сигналов  $\mathbf{y}$  на  $N$  принимающих терминалов может быть выражен следующим образом:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}$  – канальная матрица,  $\mathbf{n} - N \times 1$  – вектор АБГШ.

При предположении, что CSI известна на БС с точностью до ковариационных матриц, прекодер может быть использован для передачи сигнала для каждого из  $N$  терминалов в нужном направлении. Путём внесения предсказаний в вектор передаваемого сигнала  $\mathbf{d}$  с помощью прекодирования, компенсирующих влияние канала, на входе принимаемых терминалов можно получить принимаемый вектор сигналов с минимальным искажением

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{n} = \sqrt{\rho} \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{d} + \mathbf{n}, \quad (4)$$

Это возможно, если прекодирующая матрица является обратной канальной матрицей. Основным методом прекодирования заключается в выполнении операции обращения матрицы, что приводит к высокой вычислительной сложности, особенно при  $M \gg N$ .

#### Итерационные алгоритмы

Большое число элементов антенной решётки на БС  $M$  по сравнению с числом пользователей  $N$  приводит к тому, что матрица Грэма  $\mathbf{G}^{-1}$  стремится к диагональной матрице, в которой диагональные элементы близки к  $M$ , а недиагональные элементы обращаются в нуль [14–16]. Ещё одним недостатком наличия в алгоритме операции обращения матрицы, помимо вычислительной сложности, является то, что при использовании оценивания матрицы обучающих выборок при небольшом числе элементов выборки матрица может стать плохо обусловленной [17]. Поэтому целесообразней использовать итерационные алгоритмы нахождения обратной матрицы Грэма  $\mathbf{G}^{-1}$  вместо прямого обращения матрицы.

Итерационный алгоритм Ньютона позволяет получить приближённую, но довольно точную оценку обратной матрицы  $\mathbf{G}^{-1}$ . Рекуррентная формула данного алгоритма приведена ниже:

$$\hat{\mathbf{G}}^{-1} = \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} (2\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1}), \quad (5)$$

$$\mathbf{G}^{-1} = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{X}_k, \text{ где } \|\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{X}_0\| < 1, \quad (6)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица размерности  $N \times N$ ,  $\mathbf{X}_0$  – начальная грубая оценка. Итерационному алгоритму Ньютона требуется значительное количество итераций для сходимости.

Определение оптимальных начальных условий в данном случае является сложным и требует дополнительных вычислений. Без принятия оптимальных начальных условий алгоритм Ньютона сходится довольно долго.

#### Модифицированный алгоритм Ньютона

Предложим для решения задачи модифицированный алгоритм Ньютона. Для этого введём коэффициент масштаба, постепенно уменьшающийся с каждой итерацией, что обеспечит большую скорость сходимости итерационного алгоритма без задания оптимальных начальных условий.

Для начала рассмотрим алгоритм Ньютона. Для этого введём коэффициент связи  $\lambda$  между текущим и предыдущим значениями оценки обратной матрицы  $\mathbf{X}$ .

$$\hat{\mathbf{G}}^{-1} = \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} (2\mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1}) = 2\mathbf{X}_{k-1} - \mathbf{X}_{k-1} \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1} = (\lambda + 1)\mathbf{X}_{k-1} - \lambda \mathbf{X}_{k-1} \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1}, \quad \lambda = 1. \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{G}}^{-1} = \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} [(\lambda + 1)\mathbf{I} - \lambda \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1}], \quad \lambda = 1. \quad (8)$$

Для повышения скорости сходимости алгоритма можно увеличить коэффициент связи между текущим и предыдущим значениями оценки обратной матрицы  $\mathbf{X}$ , однако это приведёт к увеличению ошибки оценки на поздних шагах итерации. Для уменьшения ошибки оценки обратной матрицы необходимо, чтобы коэффициент связи постепенно уменьшался с каждой итерацией для обеспечения наилучшего приближения оценки к реальному значению. Следовательно, необходимо использование переменного коэффициента сходимости  $\lambda_k$  в алгоритме Ньютона:

$$\hat{\mathbf{G}}^{-1} = \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} [(\lambda_k + 1)\mathbf{I} - \lambda_k \mathbf{G} \mathbf{X}_{k-1}], \quad (9)$$

где  $\lambda_k$  постепенно уменьшается с каждой итерацией:

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} (1 - \varepsilon), \quad (10)$$

$\varepsilon$  – шаг сходимости, влияющий на величину  $\lambda_k$ .

Предельным значением будет  $\lambda_k = 0$ , когда обновления значений  $\mathbf{X}_k$  не происходит (после сходимости алгоритма).

На рис. 1 представлены результаты анализа сходимости прекодирующей матрицы и графики сходимости входного сигнала  $\mathbf{y}$  к вектору полезного сигнала  $\mathbf{d}$  для алгоритмов Ньютона и модифицированного алгоритма Ньютона при  $M = 8$ ,  $N = 3$ .

#### Результаты моделирования

В предложенном модифицированном алгоритме Ньютона скорость сходимости алгоритма определяется начальным значением коэффициента сходимости  $\lambda_0$  и шагом сходимости  $\varepsilon$ . В данном случае чем больше  $\lambda_0$ , тем больше крутизна склона характеристики сходимости в первые моменты времени.

В то же время чем больше  $\varepsilon$ , тем дольше длится сходимость (длиннее хвост характеристики сходимости). На рис. 2, 3 представлены результаты анализа сходимости прекодирующей матрицы модифицированного алгоритма Ньютона при различных начальных значениях коэффициента сходимости  $\lambda_0$  и шага сходимости  $\varepsilon$ .

Графики сходимости прекодирующей матрицы и сходимости вектора входного сигнала  $\mathbf{y}$  к вектору полезного сигнала  $\mathbf{d}$  алгоритмов от углов прихода сигналов пользователя приведены на рис. 4.

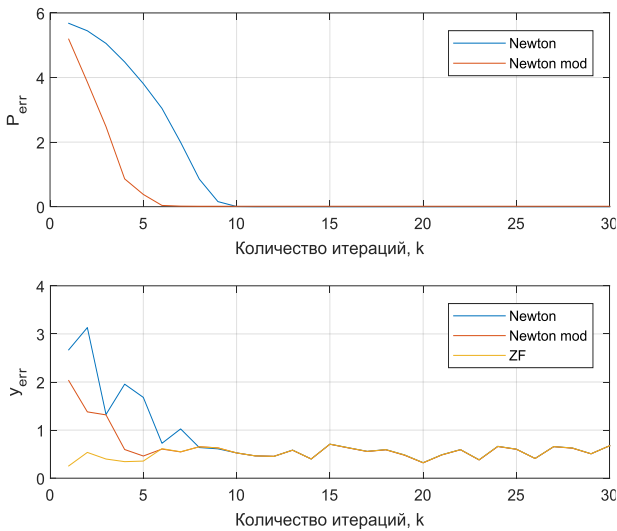
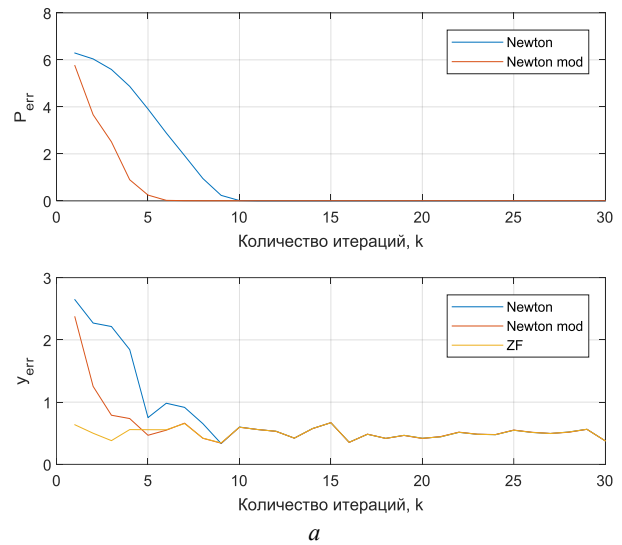


Рис. 1. Результаты анализа сходимости прекодирующей матрицы и графики сходимости входного сигнала  $y$  к вектору полезного сигнала  $d$  для алгоритмов Ньютона и модифицированного алгоритма Ньютона

Изменяя параметры модифицированного алгоритма Ньютона, можно регулировать характеристику сходимости алгоритма.



а

б

в

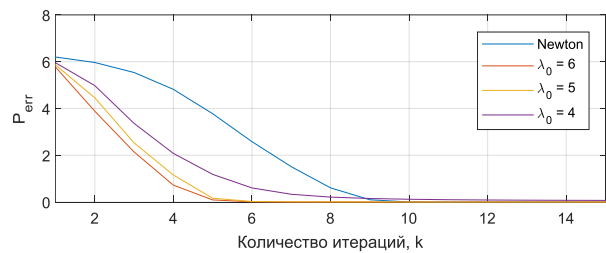


Рис. 2. Результаты анализа сходимости модифицированного алгоритма Ньютона при различных начальных значениях коэффициента сходимости и фиксированном значении шага сходимости  $\epsilon = 0,25$

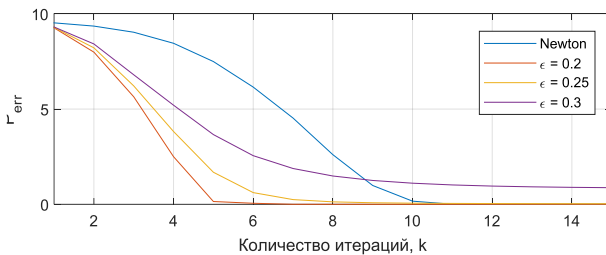


Рис. 3. Результаты анализа сходимости модифицированного алгоритма Ньютона при различных значениях шага сходимости и фиксированном начальном значении коэффициента сходимости  $\lambda_0 = 5$

**Заключение**

В данной работе рассмотрены основные итерационные алгоритмы линейного прекодирования, а также предложен новый модифицированный алгоритм Ньютона, позволяющий увеличить скорость сходимости алгоритма и уменьшить вычислительную сложность.

Скорость сходимости модифицированного алгоритма Ньютона такая же, как и у алгоритма Чебышёва без вычисления оптимальных начальных условий, при этом предложенный алгоритм имеет меньшую вычислительную сложность и обеспечивает меньшее значение ошибки на первых шагах итерации.

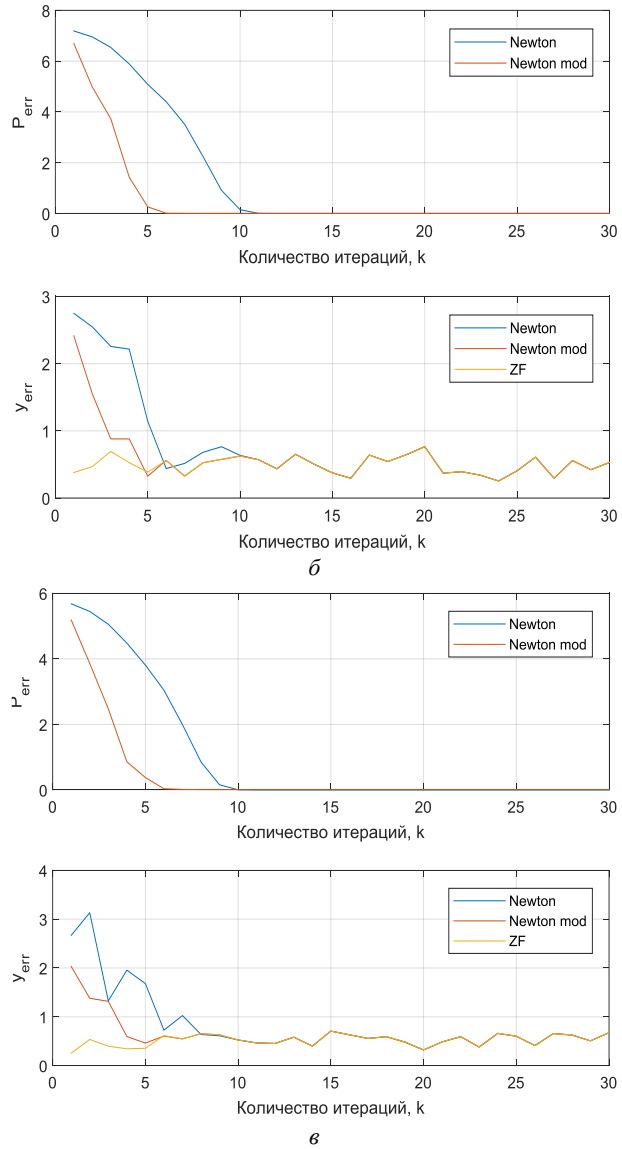


Рис. 4 (начало)

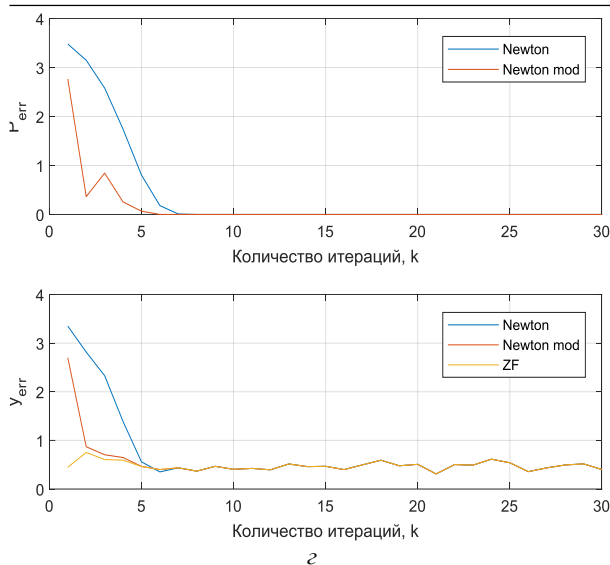


Рис. 4 (окончание). Результаты сходимости прекодирующей матрицы и сходимости вектора входного сигнала при углах прихода сигналов пользователей:

$$a - [-45; 0; 45]; \quad b - [-30; 0; 30]; \\ \epsilon - [-10; 0; 10]; \quad z - [-5; 0; 5]$$

Чем больше начальное значение коэффициента сходимости, тем больше крутизна характеристики сходимости на первых шагах итерации, однако при достаточно большом значении, устойчивость алгоритма может нарушиться. Чем больше значение шага сходимости, тем длиннее хвост характеристики сходимости (больше время сходимости алгоритма). Рекомендуется выбирать начальное значение коэффициента сходимости от 4 до 6, а значение шага сходимости увеличивать с ростом начального значения шага сходимости для более точного приближения прекодирующей матрицы к оптимальным значениям.

#### Литература

1. Albreem M.A. et al. Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 60764–60801.
2. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. – 2014.
3. Kreyndelin V., Smirnov A., Rejeb T.B. Effective precoding and demodulation techniques for 5G communication systems // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – IEEE, 2018. – P. 1–6.
4. Luo F.L., Zhang C.J. (ed.). Signal processing for 5G: algorithms and implementations. – John Wiley & Sons, 2016.
5. Di Renzo M. et al. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 102, № 1. – P. 56–103.

6. Elijah O. et al. A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO-5G system // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 18, № 2. – P. 905–923.

7. Kreindel V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. Analysis of Iterative Demodulation Algorithm for MIMO System with Different Number of Antennas // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2018. – P. 1–4.

8. Albreem M.A.M. 5G wireless communication systems: Vision and challenges // 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT). – IEEE, 2015. – P. 493–497.

9. Pillai S.S., Dhanya S., Jeemon B.K. Performance comparison of multicast MIMO systems employing spatial modulation and coded spatial modulation in fading channels // 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT). – IEEE, 2017. – P. 1529–1533.

10. Hu F. et al. An adaptive energy consumption optimization for massive MIMO systems with imperfect CSI // 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). – IEEE, 2018. – P. 377–381.

11. Rosas F., Oberli C. Impact of the channel state information on the energy-efficiency of MIMO communications // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2015. – Vol. 14, № 8. – P. 4156–4169.

12. McCloud M.L., Scharf L.L., Varanasi M.K. Beamforming, diversity, and interference rejection for multiuser communication over fading channels with a receive antenna array // IEEE Transactions on Communications. – 2003. – Vol. 51, № 1. – P. 116–124.

13. Kim S. Transmit antenna selection for precoding-aided spatial modulation // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 40723–40731.

14. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л. Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие: в 2 ч. – 2016.

15. Brown A.D. (ed.). Electronically scanned arrays MATLAB® Modeling and simulation. – CRC Press, 2017.

16. Mohan K.N., Zinka S.R., Kannadassan D. Design and analysis of Linear, Planar and Circular Array Using ARRAY TOOL.

17. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003.

#### Бойко Игорь Андреевич

Аспирант каф. радиосистем и обработки сигналов (РОС) Санкт-Петербургского гос. ун-та телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)  
Эл. почта: igorboyko24na7@gmail.com

#### Глушанков Евгений Иванович

Д-р техн. наук, проф. каф. РОС СПбГУТ  
Эл. почта: glushankov57@gmail.com

А.М. Голиков

## Оптимальное пеленгование на трассах распространения СВЧ-радиоволн

Задачей систем пеленгования является определение угловых координат источников излучения. Проведен анализ статистической модели поля, сканирующего по углу загоризонтного СВЧ-источника, учитывающей свойства функции пространственной когерентности (ФПК) поля остронаправленного источника (РЛС) на загоризонтных морских трассах. На основе такой модели проведен анализ эффективности пеленгования источников излучения с остронаправленной антенной, сканирующей по азимуту. Показана зависимость оптимальной оценки пеленга для амплитудного и фазового пеленгаторов от ФПК загоризонтного канала распространения СВЧ-радиоволн, характеристик источника излучения и пеленгаторов. Оценена величина дополнительной погрешности пеленгования, обусловленная сканированием источника.

**Ключевые слова:** оптимальные пеленгаторы, загоризонтный источник СВЧ-излучения, функции пространственной когерентности (ФПК) поля, погрешности пеленгования, неравенство Крамера–Рао, информация Фишера.

Считая диаграмму направленности антенны источника гауссовой, распределение поля в раскрыве передающей антенны, соответствующее ее обратному преобразованию Фурье, можно записать в виде

$$I_T(\rho_0, \alpha) = \exp\left[-\rho_0^2/a_T^2 + ik\alpha\rho_0\right],$$

где  $a_T^2 = 4 \ln 2/k^2 \Theta_{\Gamma}^2 = 2,77/k^2 \Theta_{\Gamma}^2$  – квадрат половины эффективной ширины раскрыва передающей антенны,  $\Theta_{\Gamma}$  – ширина диаграммы направленности источника излучения на уровне –3 дБ (в радианах).

Нормированная функция когерентности рассеянной составляющей поля сканирующего по углу источника в плоскости приемных апертур пеленгатора представлена в работе [1, 2] и определяется длиной трассы и  $l_p$  и  $\gamma$  интервалом пространственной корреляции поля и коэффициентом эллиптичности ФПК.

Для оценки угловых координат используются два основных типа пеленгаторов с амплитудным и фазовым антенными датчиками. Амплитудный антенный датчик состоит из двух направленных антенн со смещенными фазовыми центрами и диаграммами направленности, одинаковыми по форме, но разнесенными на угол  $\Delta\Theta$ . Фазовый антенный датчик состоит из двух слабонаправленных антенн, разнесенных на расстояние  $L$  поперек трассы. Для фазового датчика апертурные функции слабонаправленных ( $a_R \ll l_p$ ) приемных антенн можно записать как

$$I_{1,2}(\rho, \Theta) = \delta(\rho \pm L/2) \exp(ik\Theta\rho),$$

где  $L$  – база (расстояние между антеннами), полагая  $L^2 \ll D$  (длина трассы);  $\Theta$  – пеленг, т.е. угол между нормалью к базе и направлением на источник.

Нормированную функцию когерентности суммарного поля можно представить в виде

$$\Gamma_{\Sigma} = (\Gamma_{\phi} + g^2 \Gamma_0) / (1 + g^2),$$

где  $g^2$  – параметр когерентности, равный отношению средней интенсивности регулярной и случайной составляющих при использовании ненаправленной передающей антенны, можно получить выражение

для элементов корреляционной матрицы сигналов на выходе фазового датчика.

Для амплитудного датчика апертурные функции антенн могут быть записаны как

$$I_{1,2}(\rho, \Theta_{1,2}) = \exp\left\{-\rho^2/a_R^2 + ik\Theta_{1,2}\rho\right\},$$

при этом  $\Theta = (\Theta_1 + \Theta_2)/2$  – угол между направлением на источник и равносигнальным направлением приемных антенн (пеленг);  $\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$  – угловое разнесение двух приемных антенн.

Для анализа работы измерительных систем большое значение имеет оценка их потенциальных возможностей. Потенциальная точность оценки измеряемого параметра определяется минимальной величиной дисперсии и дает нижнюю границу чувствительности и достижимой точности измерения.

Потенциальная точность измерения (пеленгования) независимо от способа получения оценки может быть определена с помощью неравенства Крамера–Рао. Неравенство Крамера–Рао является одним из немногих строгих, сравнительно простых и наглядных средств сравнения систем оценки параметров и исследования их потенциальных возможностей. Оценка, для которой неравенство преобразуется в равенство, является наиболее эффективной. Для несмещенной оценки или оценки с постоянным смещением из неравенства Крамера–Рао следует, что дисперсия оценки не может быть меньше величины, обратной информации Фишера.

Таким образом, информация Фишера является количественной мерой предельной точности оценки. Информация Фишера может быть определена как величина, пропорциональная отношению сигнал / шум по мощности и кривизне нормированной корреляционной функции полезного сигнала по оцениваемому параметру в ее максимуме

$$J = -2q \left[ \partial^2 R(\Theta) / \partial \Theta^2 \right]_{\Theta=0},$$

где  $q$  – параметр обнаружения (энергетическое отношение сигнал / шум на выходе системы пространственно-временной обработки сигналов на фоне пространственно-временного белого шума).

Для определения дисперсии эффективной оценки пеленга в условиях неопределенности положения максимума диаграммы сканирующего источника  $\alpha$  необходимо использование информационной матрицы Фишера ( $2 \times 2$ ). Тогда информация Фишера относительно пеленга  $\Theta$  (при неизвестном  $\alpha$ ) может быть получена как

$$J = J_{\Theta\Theta} - J_{\Theta\alpha}^2 / J_{\alpha\alpha},$$

где  $J_{ij}$  – элементы информационной матрицы Фишера.

Для простоты полагаем  $g = 0$ , т.е. рассматриваем случай пеленгования по чисто рассеянному сигналу. Это оправдано, так как при загоризонтном распространении отклонения углов прихода для флуктуационной компоненты значительно больше, чем для когерентной [2] и основными источниками ошибок являются быстрые флуктуации. Также считаем, что точность пеленгования при приеме одной реализации мгновенной диаграммы определяется лишь пространственными искажениями сигналов. Так как речь идет о потенциальной точности, полагаем, что неоднозначность пеленгования, свойственная фазовым пеленгаторам, каким-либо образом устранена.

Обратные информации Фишера величины определяют дисперсии эффективных оценок пеленга загоризонтного источника с использованием фазового  $\sigma_{\text{opt}\Phi}^2$  и амплитудного  $\sigma_{\text{opt}A}^2$  пеленгаторов. Видно, что величины  $\sigma_{\text{opt}}$  для фазового и амплитудного пеленгаторов зависят от параметров самого пеленгатора ( $q_\Phi, L, a_R, \Delta\Theta$ ), параметров источника ( $k, a_T$ ) и характеристик канала распространения ( $l_p, \gamma$ ).

Результаты расчета величины относительной эффективности оценки пеленга для различных величин  $\gamma$  для случая слабонаправленной  $h = 0,1-1$  и сильнонаправленной антенны источника  $h = 1-10$  для малых  $d_\Phi, d_A = 0,1-1$  и больших искажений сигналов  $d_\Phi, d_A = 1-10$ . Результаты расчета эффективности фазового пеленгования даны на рис. 1, а амплитудного – на рис. 2. Полученные зависимости необходимы для проектирования систем определения угловых координат. Они позволяют оценить ожидаемую погрешность пеленгования по априорным сведениям о пространственных характеристиках загоризонтных каналов  $l_p$  и  $\gamma$  и выбрать соответствующие параметры пеленгаторов.

На рис. 1 представлены результаты расчета величины относительной эффективности оценки пеленга для различных величин  $\gamma = 0,5$  для случая слабонаправленной  $h = 0,1-1$  и сильнонаправленной антенны источника  $h = 1-10$  для малых  $d_\Phi, d_A = 0,1-1$  и больших искажений сигналов  $d_\Phi, d_A = 1-10$ .

Из результатов расчета следует, что как при амплитудном, так и при фазовом пеленговании сканирующего источника значительное влияние на погреш-

ность пеленгования оказывает дополнительная неопределенность.



Рис. 1. Зависимость относительной эффективности оценки пеленга фазовым пеленгатором от направленности антенны источника  $h$  для различных уровней искажения сигнала  $d$

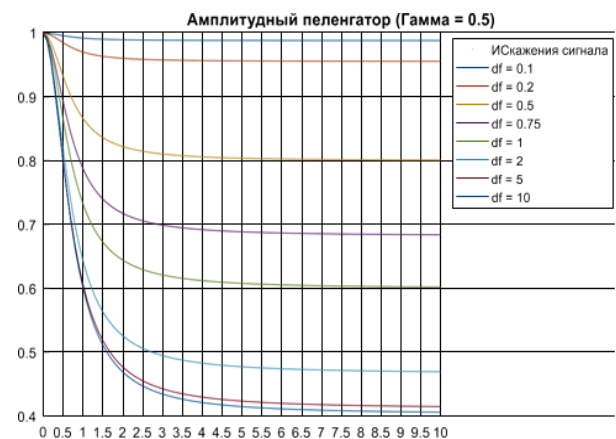


Рис. 2. Зависимость относительной эффективности оценки пеленга амплитудным пеленгатором от направленности антенны источника  $h$  для различных уровней искажения сигнала  $d$

Величина превышения этой составляющей погрешности над флуктуационной сильно зависит от параметров. С увеличением параметров величина дополнительной погрешности пеленгования увеличивается.

#### Литература

1. Акулиничев Ю.П. Анализ корреляционных характеристик случайно-неоднородных каналов при комплексном разнесении источников и приемников / Ю.П. Акулиничев, А.М. Голиков // Радиотехника и электроника. – 1987. – Т. 32, вып. 8. – С. 1646–1654.
2. Акулиничев Ю.П. Анализ эффективности пеленгования сканирующих по углу источников СВЧ-излучения на загоризонтных морских трассах / Ю.П. Акулиничев, А.М. Голиков // Доклады ТУСУР. – 2000. – Т. 4. – С. 171–182.

**Голиков Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. РТС ТУСУРа  
Эл. почта: rts2\_golikov@mail.ru

Н.Н. Колесник

## Исследование модели LTE-A мобильной системы связи 5G

Создана модель Simulink MATLAB LTE (Long Term Evolution) Downlink (DL) – нисходящего канала стандарта четвертого поколения – 4G. LTE Downlink (DL) – нисходящее соединение использует OFDMA и схемы модуляции QPSK, 16QAM, 64QAM. Отличительной особенностью LTE является использование пространственного мультиплексирования MIMO (Multiple Input Multiple Output). В проекте ГПО проведено исследование зависимости FER от SNR для различного количества антенн MIMO. Показано, что увеличение числа антенн позволяет не только увеличить скорость передачи, но и повысить помехоустойчивость передачи информации.

**Ключевые слова:** модель Simulink MATLAB LTE Downlink, OFDMA Symbol Packing, QPSK, 16QAM, 64QAM, пространственного мультиплексирования MIMO (Multiple Input Multiple Output), беспроводные сети передачи данных 5G, ультранадежная межмашинная связь со сверхнизкими задержками URLLC.

Стандарт LTE (Long Term Evolution) обеспечивает скорость передачи данных выше 100 Мбит/с, высокий уровень безопасности системы, высокую энергоэффективность, низкие задержки в работе системы. Основные параметры LTE: Uplink (UL) – восходящее соединение использует SC-FDMA и схемы модуляции BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM; Downlink (DL) – нисходящее соединение использует OFDMA и схемы модуляции QPSK, 16QAM, 64QAM. Отличительной

особенностью LTE является использование пространственного мультиплексирования MIMO (Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход) [1]. Сети LTE и их модификации применяются для построения мобильных беспроводных сетей передачи данных 5G – ультранадежной межмашинной связи со сверхнизкими задержками URLLC [2]. Разработана модель канала Downlink системы мобильной связи стандарта LTE Simulink MATLAB (рис. 1).

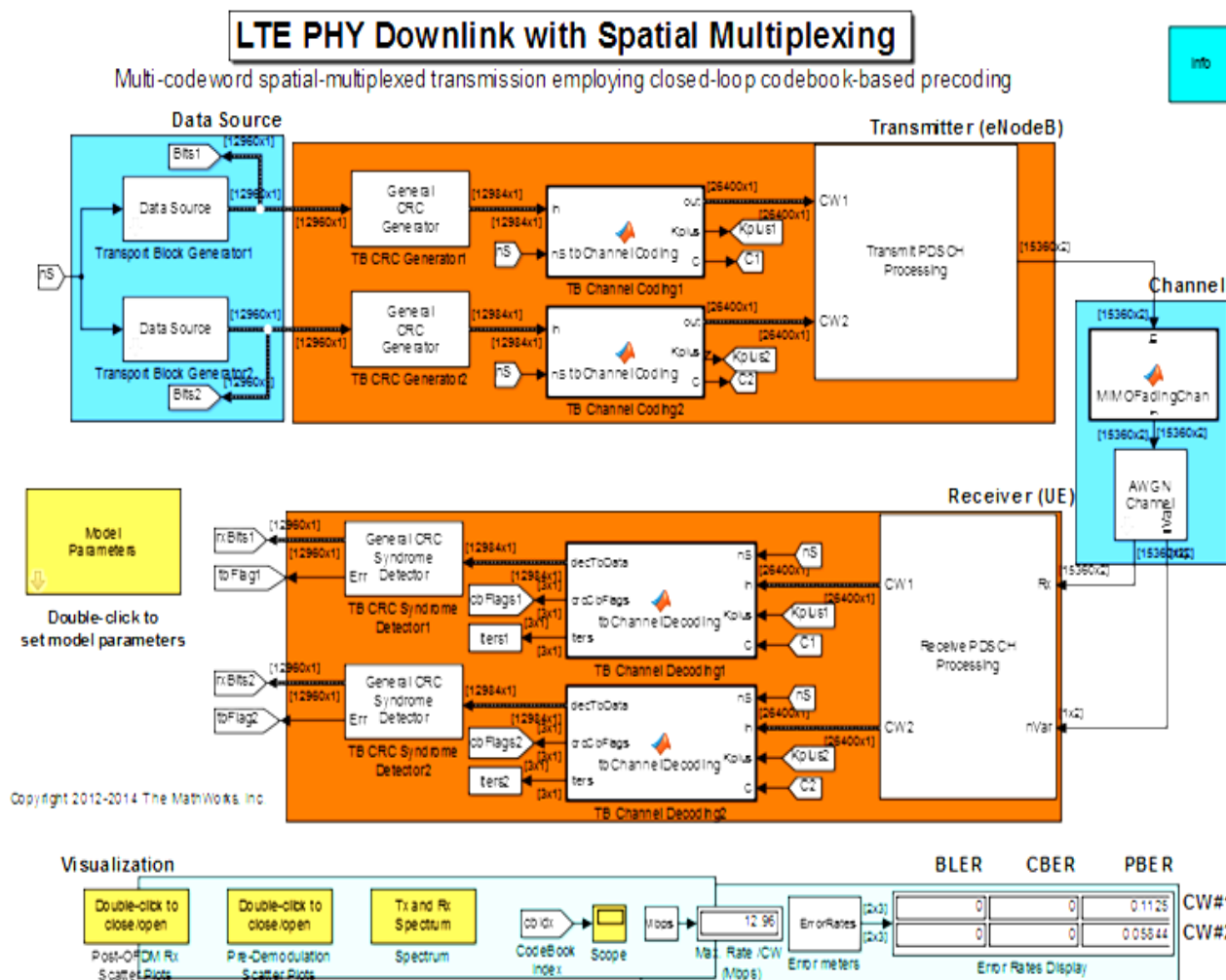


Рис. 1. Модель канала Downlink

В канале Downlink используются модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM. Полученная последовательность потока мультиплексируется с ортогональным частотным разделением канала, и за счет этого формируются OFDMA символы. Модель позволяет формировать характеристики передачи данных по каналу Downlink, а именно изменять ширину спектра, количество антенн в MIMO, вид модуляции, отношение сигнал / шум. Были получены зависимости FER (вероятности ошибки в кадре) от SNR для различного количества антенн на передачу и прием.

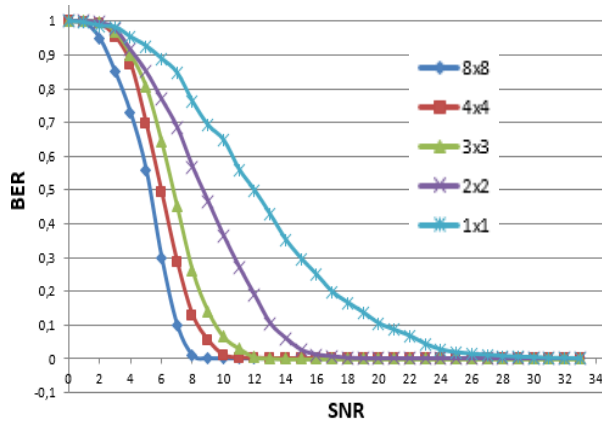


Рис. 2. Зависимость вероятности появления ошибки (FER) от соотношения сигнал / шум (SNR)

Результаты исследования модели представлены на рис. 3–9.

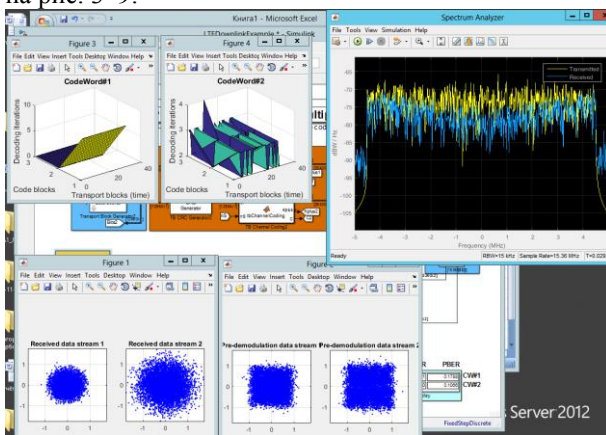


Рис. 3. Спектрограмма, созвездие и итерации декодера при 16QAM. SNR = 10 дБ

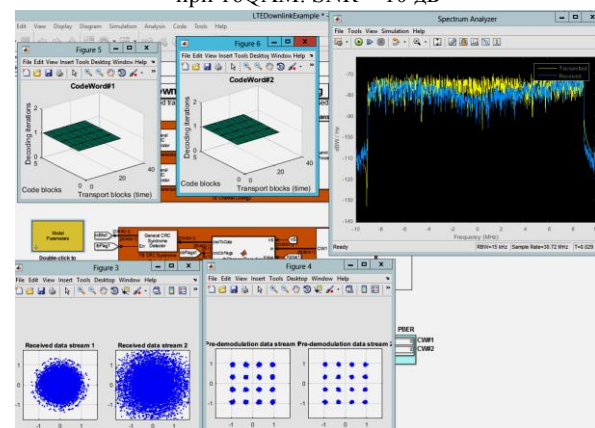


Рис. 4. Спектрограмма, созвездие и итерации декодера при 16QAM. SNR = 30 дБ

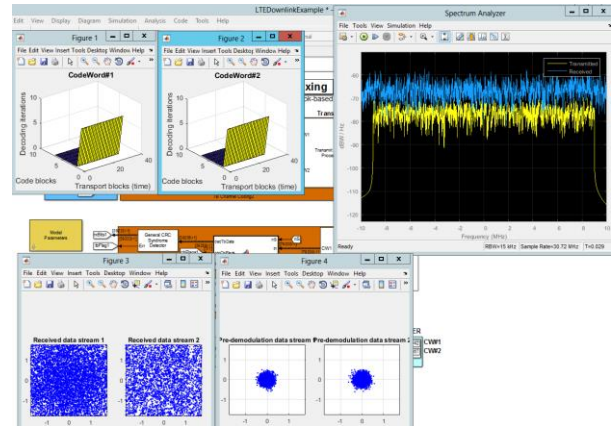


Рис. 5. Спектрограмма, созвездие и итерации декодера при 64QAM. SNR = -15 дБ

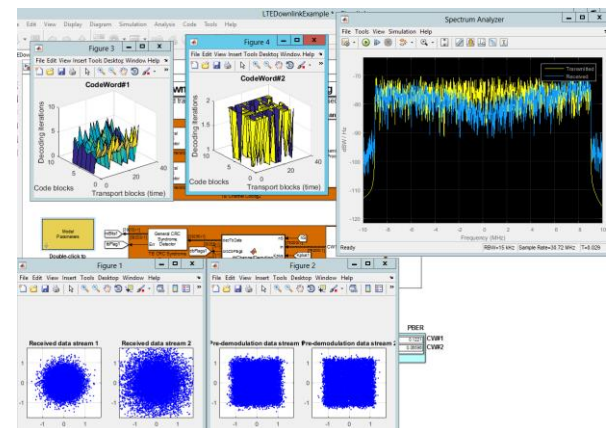


Рис. 6. Спектрограмма, созвездие и итерации декодера при 16QAM. SNR = 15 дБ

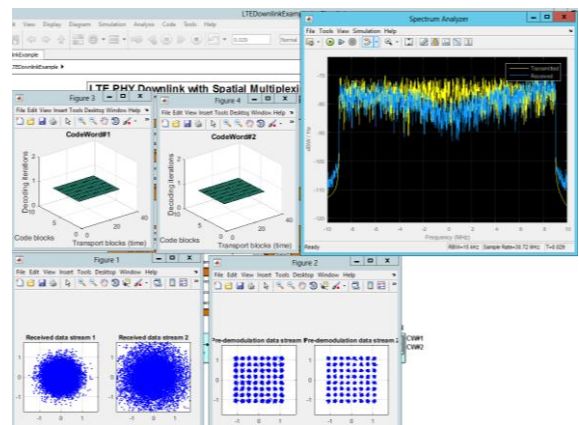


Рис. 7. Спектрограмма, созвездие и итерации декодера при 16QAM. SNR = 30 дБ

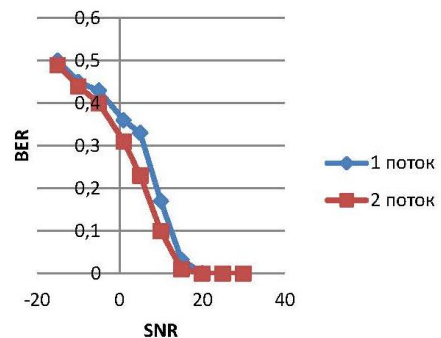


Рис. 8. Зависимость SNR от BER для 16-QAM

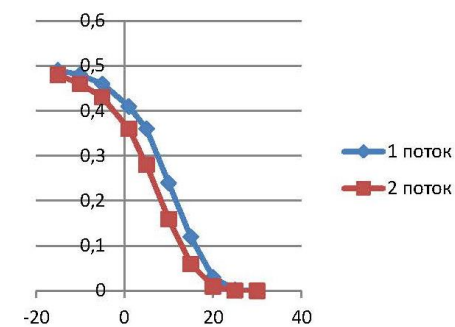


Рис. 9. Зависимость SNR от BER для 64-QAM

Разработанная модель Simulink MATLAB LTE будет использована для проектирования мобильных беспроводных сетей передачи данных 5G – ультра-

дежной межмашинной связи со сверхнизкими задержками URLLC, в частности, для беспилотного транспорта.

*Литература*

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2018. – 452 с.
2. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G: в 2 т. – Т. 1. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 384 с.

**Колесник Николай Николаевич**  
 Студент каф. РТС ТУСУРа  
 Эл. почта: uirtu45u5@gmail.com



А.М. Голиков, А.В. Лоскутникова

## Фрактальная обработка радиолокационных изображений

Разработана MatLab-модель фрактального кодирования и проведена ее апробация на примере 50 РЛ-изображений. Модель фрактального кодирования позволит создать фрактальный обнаружитель РЛ-объектов, для этого будет использовано распределение самоподобия, которое определяется на основе доменных блоков.

**Ключевые слова:** модель фрактального кодирования, фрактальный обнаружитель, доменные блоки, метод квадродерева.

**Фрактальное кодирование.** Разработана MatLab-модель фрактального кодирования и проведена ее апробация на примере 50 РЛ-изображений. Модель фрактального кодирования позволит создать фрактальный обнаружитель РЛ-объектов, для этого будет использовано распределение самоподобия, которое определяется на основе доменных блоков [1–4]. Проведено исследование эффективности алгоритма фрактального кодирования на примере фрактальной обработки 50 РЛ-изображений. В ходе выполнения алгоритма фрактального кодирования, основанного на разложении изображения на блоки методом квадродерева, были построены гистограммы основных параметров фрактального кодирования по 50 изображениям.

В системе MatLab была выполнена программа, выполняющая фрактальное кодирование изображения.

Данная программа меняет размер изображения на конкретный (256×256), затем делает декомпозицию изображения с помощью эффективного метода разложения Quadtree (квадродерева), далее кодирует по Хаффману, сжимает, декодирует по Хаффману и разжимает.

Известно, что подход разложения по Quad-дереву показывает очень значительное улучшение в коэффициентах сжатия и значениях PSNR (дословно переводится, как пиковое отношение сигнал / шум, которое применяется для оценки искажений (потерь) в сжатом изображении). К достоинствам метода можно отнести адаптивность: изображение разбивается на большее количество блоков на тех участках, где имеется больше деталей для кодирования.

Абсолютное большинство программных реализаций использует данную схему разбиения, считая вершиной квадродерева наибольший квадрат, вписываемый в исходное изображение.

При построении квадродерева вначале производится грубое разбиение изображения, например, на четыре прямоугольника. Для каждого полученного рангового блока алгоритм пытается подобрать соответствующий доменный блок и коэффициенты отображения, которые наилучшим образом покрывают ранговый блок. Если получилось покрытие в пределах допустимой погрешности, то этот ранговый блок отмечается как обработанный и берется следующий. В случае если покрытие не найдено, блок аналогично разбивается на 4 части. Процедура разбиения прово-

дится до тех пор, пока не будет достигнута максимальная заданная глубина вложенности, и изображена на рис. 1.

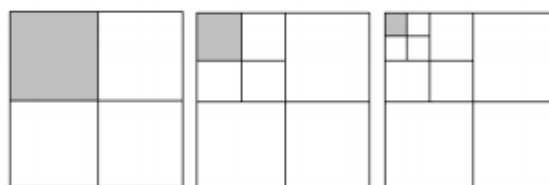


Рис. 1. Разбиение на ранговые блоки с помощью квадродерева

Требования к изображениям:

- чёрно-белое;
- разрешение  $N \times N$ , где  $N$  – число, являющееся степенью двойки;
- формат – \*.jpg.

При запуске программы появится окно выбора изображения, как указано на рис. 2.

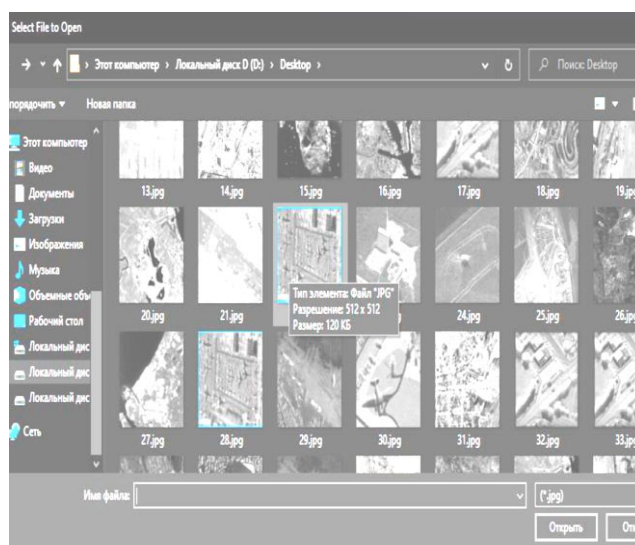
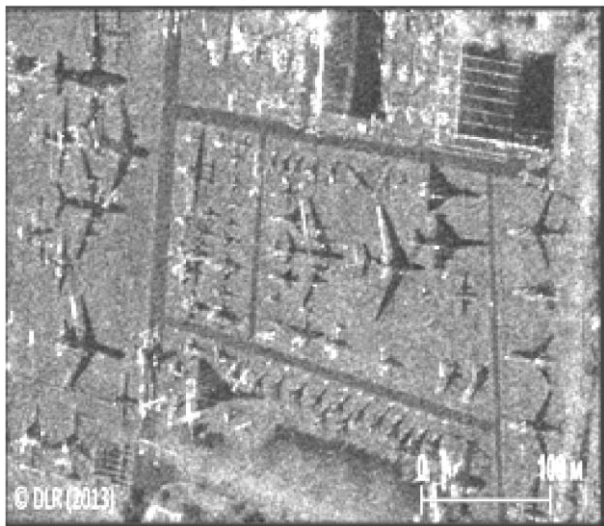


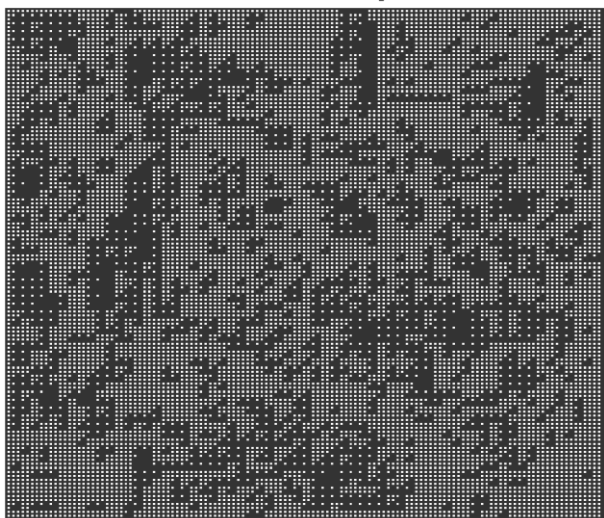
Рис. 2. Окно MatLab-модели фрактального кодирования

Таким образом, в работе были разработаны и апробированы алгоритмы вейвлет-фильтрации РЛ-сигналов и изображений. Разработана и исследована, на примере 50 РЛ-изображений модель фрактального кодирования, которая позволит создать фрактальный обнаружитель малоразмерных РЛ-объектов на фоне земной поверхности.

Original Image



Quadtree Decomposition



Decompressed Image



Рис. 3. Пример фрактального кодирования РЛ-изображения «Аэродрома»

Original Image



Quadtree Decomposition



Decompressed Image



Рис. 4. Пример фрактального кодирования РЛ-изображения «Морского порта»

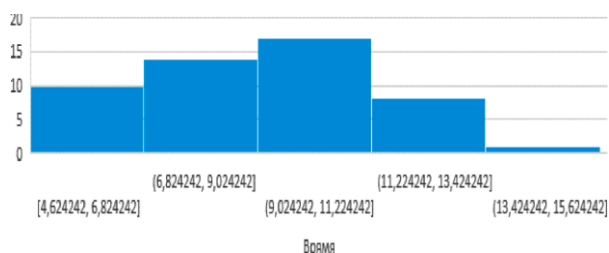


Рис. 5. Гистограмма распределения времени (секунды) затраченного на фрактальное кодирование по 50 РЛ-изображениям

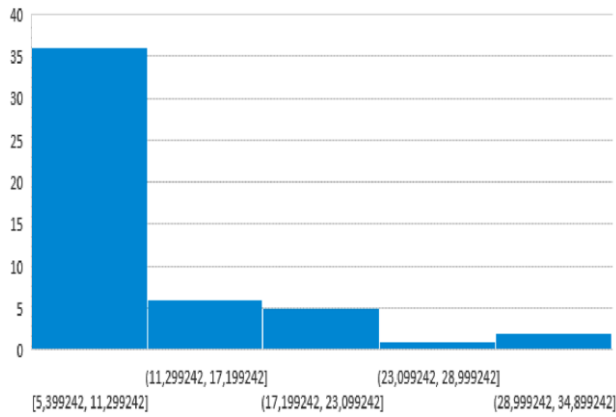


Рис. 6. Гистограмма распределения коэффициента компрессии при фрактальном кодировании для 50 РЛ-изображений

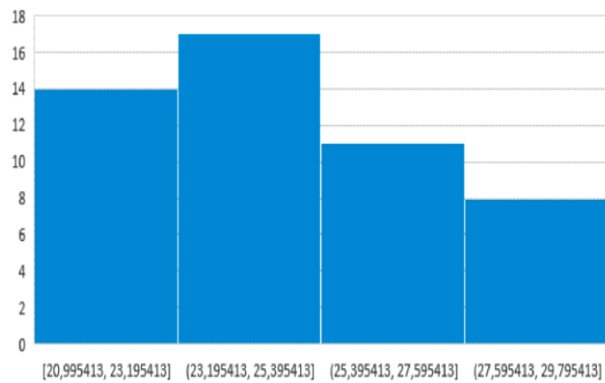


Рис. 7. Гистограмма распределения уровня отношения сигнал / шум (PSNR) при фрактальном кодировании для 50 РЛ-изображений

Для создания фрактального обнаружителя будет использовано распределение самоподобия, которое определяется на основе доменных блоков [1].

#### Литература

1. Потоцкий А.Н. Информативность фрактальных признаков в задачах текстурного анализа оптических и радиолокационных изображений // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 12. – С. 106–118.
2. Голиков А.М., Богданов А.Ф. Фрактальное сжатие изображений дистанционного зондирования Земли спутниковой РЛС X-SAR // Современные проблемы радиоэлектроники. – 2017. – С. 217–221.
3. Потапов А.А. Методы обработки малоcontrastных изображений и сверхслабых сигналов интегральными операторами и дробными фрактально-скейлинговыми методами // Инновационные разработки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. – М.: Република, 2013. – С. 15.
4. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой / под ред. Р.П. Быстрова, А.П. Соколова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

**Голиков Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. РТС ТУСУРа  
Эл. почта: rts2\_golikov@mail.ru

**Лоскутникова Анна Вениаминовна**

Студентка каф. каф. РТС ТУСУРа  
Эл. почта: a.v.loskutnikova@mail.ru

Н.И. Воронцов, Г.И. Ляхов

## Модель радара с вейвлет-фильтрацией сигналов

Разработана Simulink MatLab-модель радиолокационного канала с аддитивным шумом для передачи / приема сигналов ЛЧМ и ФКМ и их вейвлет-фильтрации, разработана Simulink-модель вейвлет-фильтра Хаара, проведены ее испытания.

**Ключевые слова:** Simulink MatLab-модель, радиолокационный канал с аддитивным шумом, радиолокационные сигналы ЛЧМ и ФКМ.

Разработана Simulink MatLab-модель генератора сигналов ЛЧМ и ФКМ. Разработана Simulink MatLab-модель радиолокационного канала с аддитивным шумом и доплеровским сдвигом (для разных скоростей носителя) для передачи / приема сигналов ЛЧМ и ФКМ. Разработана Simulink MatLab-модель вейвлет-фильтра Хаара для сигналов с ЛЧМ и ФКМ. Проведены испытания программного комплекса Simulink MatLab-модели с генератором сигналов ЛЧМ и ФКМ, радиолокационным каналом и вейвлет-фильтром Хаара для разных отношений сигнал / шум и доплеровских частот.

На рис. 1 представлена блок-схема разработанного программного комплекса.

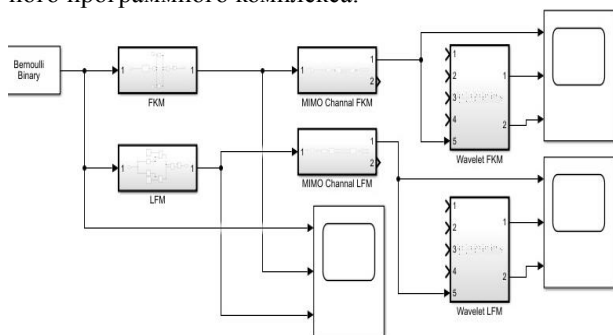


Рис. 1. Simulink MatLab-модель вейвлет-фильтрации сигналов РЛС с ЛЧМ и ФКМ

В программный комплекс входят следующие блоки:

- 1) Bernoulli Binary – генератор псевдослучайной последовательности;
- 2) ФКМ – генератор ФКМ-сигналов;
- 3) Блок LFM – генератор ЛЧМ-сигналов;
- 4) MIMO Channal FKM – радиолокационный канал с аддитивным шумом для сигнала ФКМ;
- 5) MIMO Channal LFM – радиолокационный канал с аддитивным шумом для сигнала ЛЧМ;
- 6) Wavelet FKM – вейвлет-фильтры для сигнала с ФКМ;
- 7) Wavelet LFM – вейвлет-фильтры для сигнала с ЛЧМ;

### Блоки индикации сигналов

Блок Bernoulli Binary генерирует случайное двоичное число, которое поступает в модуль BPSK. Модуль BPSK модулирует сигнал, делая его комплексным, что позволяет в дальнейшем использовать его для простого механизма определения фазы сигнала. В блоке Complex to Real-Imag происходит переключе-

ние при определенном значении сигнала. Далее производится перемножение этих сигналов с опорными сигналами синусов разных начальных фаз (в данном случае это  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 90$ ) и суммирование полученных сигналов.

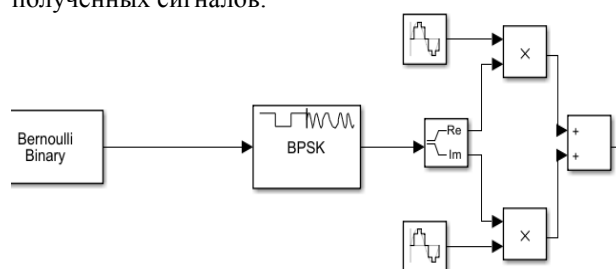


Рис. 2. Simulink-модель генератора ФКМ-сигналов

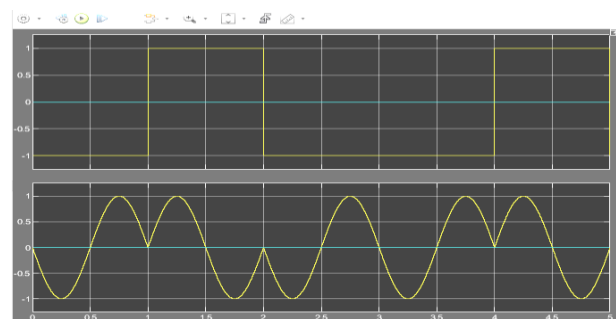


Рис. 3. Сигнал с ФКМ

На рис. 4 представлена Simulink-модель генератора ЛЧМ-сигналов.

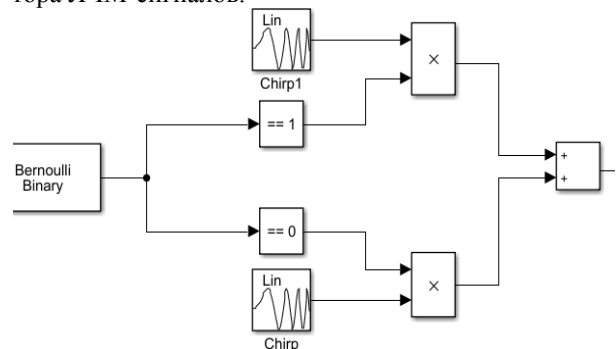


Рис. 4. Simulink-модель генератора ЛЧМ-сигнала

Блок Bernoulli Binary генерирует случайное двоичное число, далее оно приобретает модуляцию в зависимости от значения путем сравнения с нулем и единицей, что позволяет в дальнейшем использовать его для простого механизма определения изменения частоты. Производится перемножение этих сигналов

с опорными сигналами ЛЧМ с разным изменением частот (в данном случае это  $\Delta f_0 = 20$  и  $\Delta f_1 = 10$  Гц) и суммирование полученных сигналов (рис. 5).

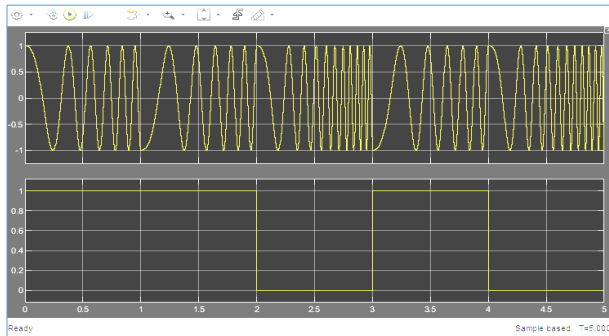


Рис. 5. Сигнал с ЛЧМ

На рис. 6 представлен итоговый переданный сигнал ФКМ с аддитивным шумом и доплеровским сдвигом частоты. На рис. 7 изображен шум, находящийся в канале передачи.

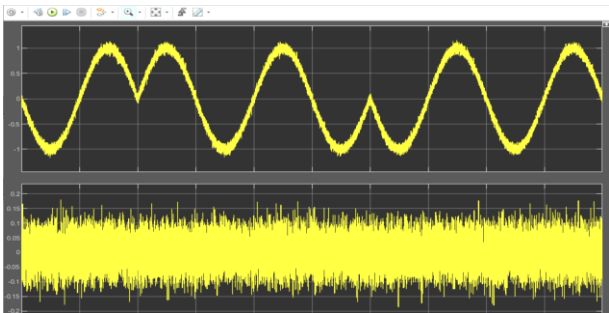


Рис. 6. Сигнал с ФКМ на выходе канала с аддитивным шумом

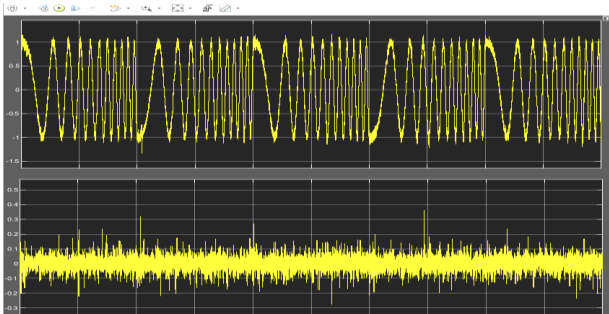


Рис. 7. Сигнал с ЛЧМ на выходе канала с аддитивным шумом

На рис. 8 и 9 показан результат работы программного комплекса, приведен ФКМ-сигнал с аддитивным шумом на выходе радиолокационного канала, сигнал на выходе вейвлет-фильтра Хаара и «остаток от фильтрации».

На рис. 10 приведен результат работы программного комплекса – ЛЧМ-сигнал с аддитивным шумом на выходе радиолокационного канала, сигнал на выходе вейвлет-фильтра Хаара и «остаток от фильтрации» (сверху вниз).

Дальнейшее развитие программного комплекса на базе Simulink MatLab-модели вейвлет-фильтрации РЛ-сигналов с ЛЧМ и ФКМ будет направлено на создание многоканального генератора сигналов ФКМ и

ЛЧМ, добавление Simulink-моделей вейвлет-фильтров Добеши, Симлета, биортогонального вейвлета и вейвлета Фейера.

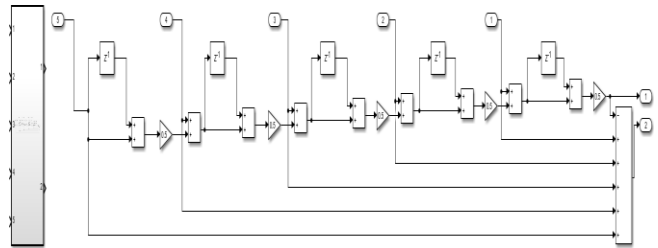


Рис. 8. Simulink-модель вейвлет-фильтра Хаара

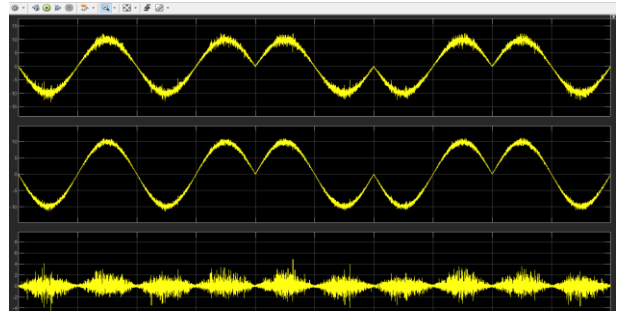


Рис. 9. Результат вейвлет-фильтрация ФКМ-сигнала

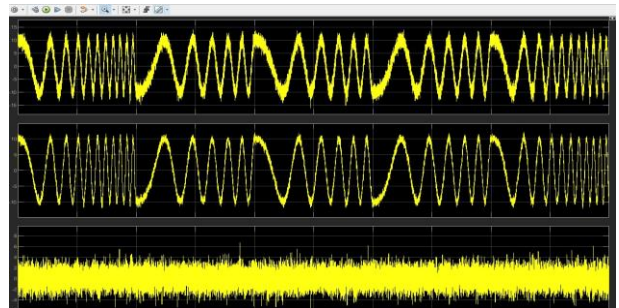


Рис. 10. Результат вейвлет-фильтрация ЛЧМ-сигнала

### Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – 3-е изд., перераб. и доп.: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012.
2. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2021. – 452 с.
3. Голиков А.М., Рябинин Е.А., Кузьменко Ю.Д. Экспериментальные исследования и вейвлет-фильтрация сигналов морского радиолокатора на фоне взволнованной морской поверхности // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2012. – С. 49–52.

**Воронцов Никита Игоревич**  
Студент каф. РТС ТУСУРа  
Эл. почта: nikita1508voron@gmail.com

**Ляхов Герман Игоревич**  
Студент каф. РТС ТУСУРа  
Эл. почта: geryahov@gmail.com

Е.И. Глушанков, Е.А. Рылов, А.А. Хренов

## Потенциальная эффективность систем морской радиосвязи с пространственной обработкой сигналов

Дана оценка потенциальной помехоустойчивости пространственной обработки сигналов (ПОС) в системах морской радиосвязи. На модели взаимодействия антенной системы и источника помех рассмотрены игровые задачи ПОС. Конструктивным результатом анализа эффективности ПОС в конфликтных условиях будет являться отказ от адаптации в направлениях прихода оптимизированных помех и формирование ограничений на уровень боковых лепестков в этих направлениях.

**Ключевые слова:** пространственная обработка сигналов, игровые задачи, морская связь, анализ эффективности, антенная система, источник помех.

Большинство известных методов пространственной обработки сигналов (ПОС) предназначено для функционирования в условиях стационарных (в широком смысле – по пространственным и временным параметрам) помех. Поэтому при воздействии нестационарных (например, импульсных, «мерцающих» и др.) помех эффективность ПОС резко снижается [1, 2]. В то же время зачастую отсутствуют точные априорные сведения о характере действующих на радиосистему помех. Поэтому исключительно важным является оценка потенциальной (гарантированной) помехоустойчивости ПОС при воздействии на систему морской радиосвязи с многоэлементными антеннами наихудших помех, что может быть оценено в конфликтных условиях взаимодействия системы связи и источника помех.

Постановку игровых задач ПОС в конфликтных условиях рассмотрим на модели взаимодействия антенной системы (АС) и источника помех (ИП) (рис. 1), где СУ – система управления, реализующая процедуры ПОС и формирующая воздействия для управления диаграммой направленности (ДН) соответствующей АС; КН, КУ, КР и КП – каналы наблюдения, управления, разведки и подавления соответственно;  $S_i(t)$ ,  $i = 1, 2$  – полезный сигнал.

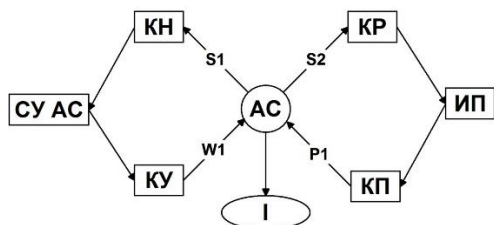


Рис. 1. Модель взаимодействия антенной системы и источника помех

На основе анализа помех СУ формирует управляющее воздействие  $W_i(t) \in C^L \times \omega$ , представляющее собой вектор весовых коэффициентов (ВВК) АС, где  $C^L$  –  $L$ -мерное комплексное пространство;  $L$  – число элементов антенной системы (АС);  $\omega$  – множество возможных управлений (состояний амплитудно-фазового распределения токов по раскрытию АС, определяемых ВВК);  $i = 1, 2$ . Источник помех формирует на основе анализа  $S_i(t)$  управляющее воздействие

$P_i(t) \in C^L \times X$ , описывающее огибающую помех на апертуре АС, где  $X$  – множество значений помех.

В качестве показателя эффективности возьмем значение отношения сигнал / (помеха+шум) (ОСПШ) на выходе АС  $I: X \times \omega \rightarrow R^1$ , где  $R^1$  – множество действительных чисел,

$$I = \int_0^T \sum_{i=1}^2 \frac{W_i^T(t) W_i(t) S_i^2(t)}{W_i^T(t) P_i(t) P_i^T(t) W_i(t)} dt.$$

Тогда задачу синтеза методов ПОС в конфликтных условиях функционирования систем морской радиосвязи можно сформулировать в виде игры:

$$\Gamma = \langle \omega, X, I \rangle, \quad (1)$$

где  $\omega$  – множество стратегий СУ;  $X$  – множество стратегий ИП;  $I$  – цена игры.

Решение игры (1) может быть выполнено лишь при учете инерционности СУ  $\tau_w$  и ИП  $\tau_p$ ;  $\tau_w$  включает в себя время наблюдения  $\tau_n$  (оценка параметров  $P_i(t)$ ), время принятия решения  $\tau_\phi$  (формирования ВВК) и время доведения управляющих воздействий  $\tau_d$ , т.е.  $\tau_w = \tau_n + \tau_\phi + \tau_d$ ;  $\tau_p$  включает в себя время приема и оценки параметров полезного сигнала  $\tau_o$ , время формирования помех  $\tau_n$  и время подавления  $\tau_b$ , т.е.  $\tau_p = \tau_o + \tau_n + \tau_b$ .

Рассмотрим два случая динамического взаимодействия СУ и ИП, определяемого соотношениями между  $\tau_w$  и  $\tau_p$ .

1.  $\tau_w < \tau_p$ . В данном случае в результате решения бесконечной антагонистической игры  $\Gamma$  (1) получаем, что СУ и ИП имеют  $\epsilon_w, \epsilon_p$  – оптимальные нерандомизированные стратегии  $m_w, m_p$ , выбираемые из условий:

$$m_w: \omega_x = \sup_{\omega'_x \in \omega} I(\omega'_x, P_y), \quad (2)$$

$$m_p: P_y = \inf_{P'_y \in X} I(\omega_x, P'_y), \quad (3)$$

где  $\omega_x, \omega'_x \in \omega$  – управления СУ;  $P_y, P'_y \in X$  – управления ИП;  $m_w \in M_w, m_p \in M_p$  – стратегии СУ, ИП, причем:

$$I(\omega_x, P'_y) - \epsilon_w \leq \langle I(\omega'_x, P_y) \rangle \leq I(\omega'_x, P_y) + \epsilon_p.$$

При этом

$$I(m_w) + \epsilon_p = I(m_p) - \epsilon_w = I_0(W_0, P_n),$$

где  $I(\cdot)$  – ОСПШ на выходе АС при вычислении оптимальной весовой матрицы  $W_0$  и ограниченной сред-

ней мощности помех  $P_{\Pi}$ ;  $\langle \cdot \rangle$  – знак статистического усреднения.

Таким образом, при  $\tau_w < \tau_p$  никакая стратегия ИП не обеспечит подавление АС на величину, большую  $\langle I_0(\cdot) \rangle$ . Оптимальной нерандомизированной стратегией СУ в данном случае является стратегия, состоящая в формировании ВВК, удовлетворяющего уравнению Винера–Хопфа, с использованием одного из известных алгоритмов ПОС [3]. Оптимальная же нерандомизированная стратегия ИП состоит в подавлении АС стационарной непрерывной помехой с максимально возможной (в рамках заданных ограничений) пиковой мощностью. В любом другом случае выигрыш СУ будет большим  $I_0(\cdot)$ .

2.  $\tau_w \geq \tau_p$ . При решении (1) имеем, что оптимальной является рандомизированная стратегия ИП:

$$m_p = \mu(dP_y), \quad P_y^T = (P_1, P_2, \dots, P_m),$$

причем  $\sum_{i=1}^m P_i \leq P_{\Pi}$ , состоящая в случайном переключении «чистых» стратегий ИП.

Можно показать, что при  $\tau_w \geq \tau_p$  в игре (1) множество  $X$  стратегий ИП являются подмножеством вещественного линейного топологического пространства, а функции выигрыша по  $P_y \in X$  выпуклы и непрерывны. Поэтому, согласно [4], игра (1) имеет значение, игрок 1 (СУ) имеет «чистую» оптимальную стратегию  $\omega_x \in \omega$ , а игрок 2 (ИП) при  $\varepsilon_p > 0$  имеет  $\varepsilon_p$ -оптимальную стратегию, являющуюся смесью конечного числа «чистых» стратегий.

Таким образом, смешанной  $\varepsilon_p$ -оптимальной стратегией ИП является переключение через промежутки времени  $\tau_p$  «чистых» стратегий, что соответствует включению-выключению нескольких ИП. «Чистая» стратегия СУ состоит в осуществлении ПОС с минимизацией усилий (контролем уровня боковых лепестков ДН) в выбранных направлениях за счет введения соответствующих ограничений.

Результаты анализа эффективности ПОС в конфликтных условиях представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что при  $\tau_w \geq \tau_p$  конструктивным является

отказ от адаптации в направлениях прихода оптимизированных помех и формирование ограничений на уровень боковых лепестков в этих направлениях.

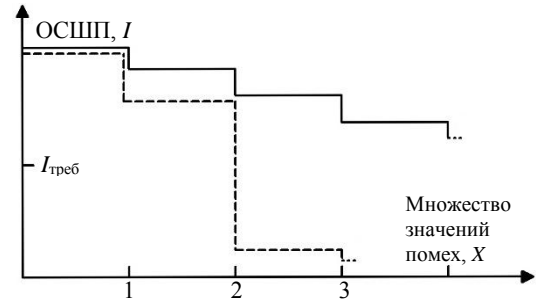


Рис. 2. Анализ эффективности ПОС: — с ограничениями; - - - - адаптивная, без ограничений

### Литература

1. Глушанков Е.И., Гусев Н.А. Повышение эффективности подавления импульсных помех в адаптивных антенных решетках // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1990. – Т. 33, № 5. – С. 55–56.
2. Пространственно-временная обработка сигналов в конфликтных условиях / Е.И. Глушанков, В.И. Зимарин, В.Р. Мисюра, В.А. Родимов // Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи: Приложение к журналу «Радиотехника». – 1992. – С. 34–36.
3. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. – М.: Радио и связь, 1986.
4. Воробьев Н.Н. Основы теории игр. Бескоалиционные игры. – М.: Наука, 1984.

### Глушанков Евгений Иванович

Д-р техн. наук, проф. каф. радиосистем и обработки сигналов (РОС) Санкт-Петербургского гос. ун-та телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)  
Эл. почта: glushankov57@gmail.com

### Рылов Евгений Александрович

Генеральный директор АО «ПКБ «РИО»  
Эл. почта: rylov79@mail.ru

### Хренов Андрей Александрович

Студент СПбГУТ

Е.А. Шинкевич

## Вейвлет-фильтрация радиолокационных сигналов

Проведены разработка и исследование алгоритмов вейвлет-фильтрации радиолокационных (РЛ) сигналов с целью повышения эффективности обнаружения и оценки координат малоразмерных наземных объектов. Разработаны алгоритмы вейвлет-фильтрации сигналов ФКМ и ЛЧМ, исследована эффективность фильтрации сигналов вейвлетами Хаара, Добеши, Симлета, биортогональным вейвлетом и вейвлетом Фейера. Показано, что вейвлет Симлета обеспечивает лучшую фильтрацию РЛ-сигналов от шумов.

**Ключевые слова:** алгоритмы вейвлет-фильтрации, радиолокационные сигналы ЛЧМ и ФКМ, вейвлет Хаара.

**Вейвлеты** – это математические функции, позволяющие анализировать различные частотные компоненты сигналов. В общем случае анализ сигналов производится в плоскости вейвлет-коэффициентов (масштаб–время–уровень) [1].

### Вейвлет фильтрация РЛ-сигналов

Проведена разработка алгоритмов программ вейвлет-фильтрации РЛ-сигналов с ФКМ и ЛЧМ, исследована эффективность фильтрации сигналов вейвлетами Хаара, Добеши, Симлета, биортогональным вейвлетом и вейвлетом Фейера [1, 3].

На рис. 1 и 2 представлены изображения окна Wavelet Toolbox Matlab с разложением ФКМ и ЛЧМ сигнала вейвлетом Хаара, а на рис. 3 и 4 – вейвлетом Добеши.

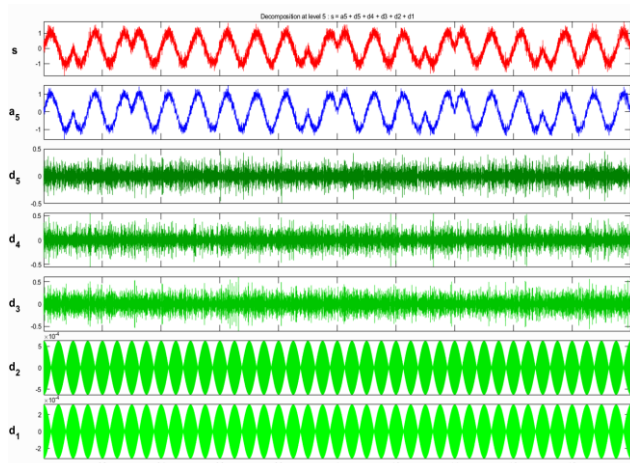


Рис. 1. Разложение ФКМ-сигнала вейвлетом Хаара

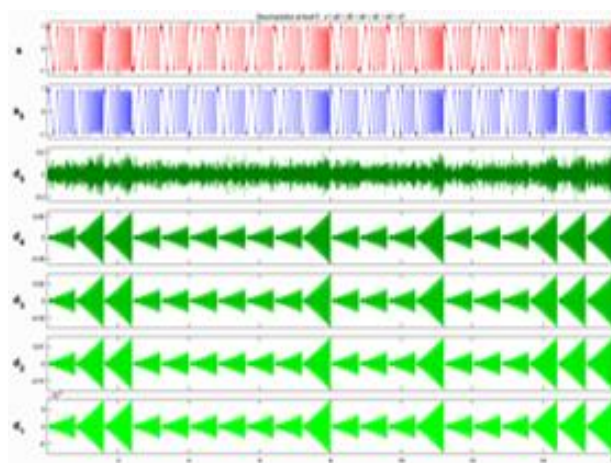


Рис. 2. Разложение ЛЧМ-сигнала вейвлетом Хаара

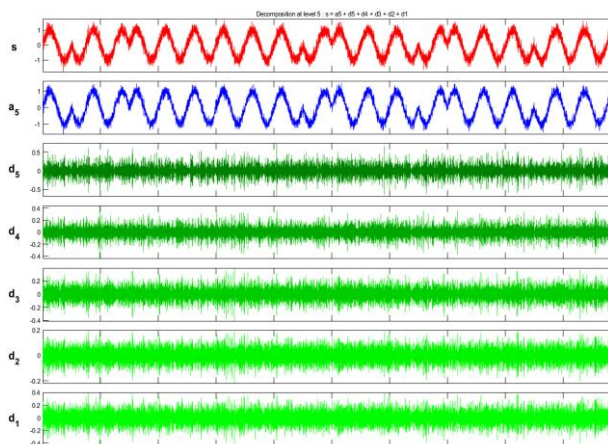


Рис. 3. Разложение ФКМ-сигнала вейвлетом Добеши

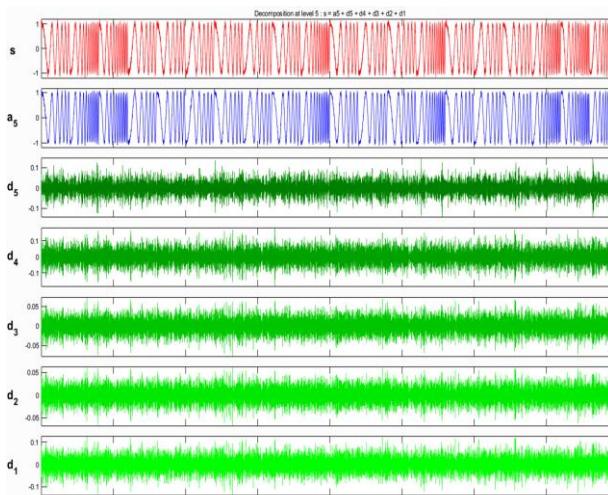


Рис. 4. Разложение ЛЧМ-сигнала вейвлетом Добеши

На рис. 5–8 представлены окна программы вейвлет-фильтрации ФКМ- и ЛЧМ-сигналов вейвлетом Хаара. Для каждого сигнала было проведено по 50 испытаний с выборкой 1024 отсчета. На рисунках обозначено: *s* – сигнал с шумом, *a* – отфильтрованный сигнал, уровни вейвлет-разложений d1–d5 (колонка слева). В центре рисунков зашумленный сигнал, вейвлет-спектр и вейвлет-спектр «остатка сигнала» после фильтрации.

На рис. 9–12 представлены характеристики разности между исходным и очищенным сигналами: интегральное и дифференциальное распределения «шумов» (остатков после очистки), их автокорреляционные функции и спектры для вейвлета Хаара и Добеши.



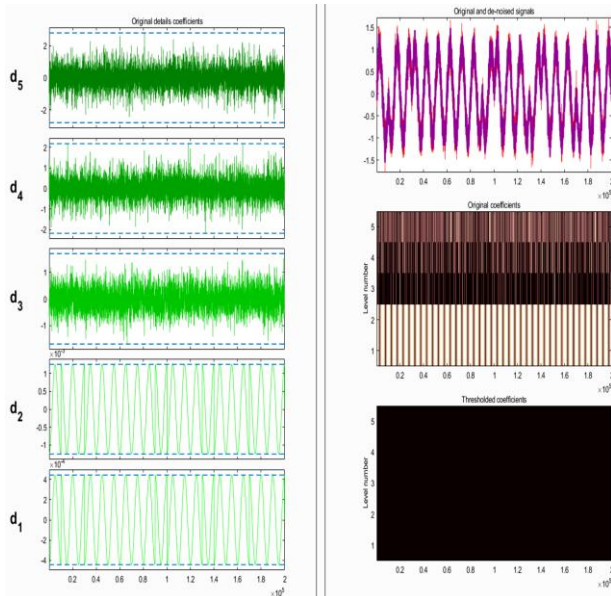


Рис. 5. Фильтрация ФКМ с помощью вейвлета Хаара

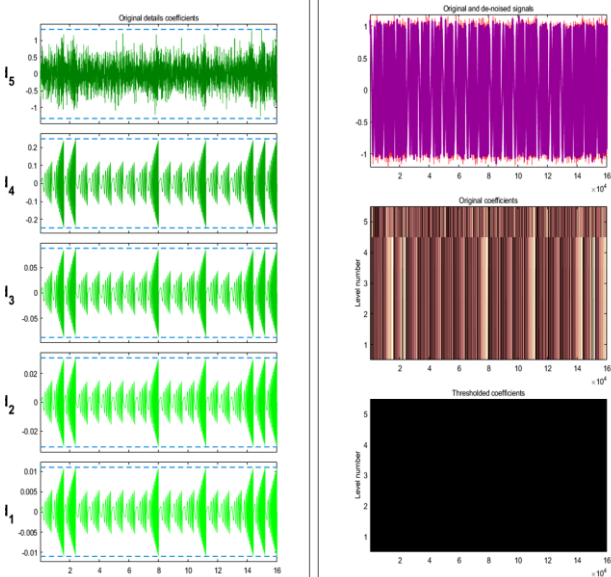


Рис. 6. Фильтрация ЛЧМ с помощью вейвлета Хаара

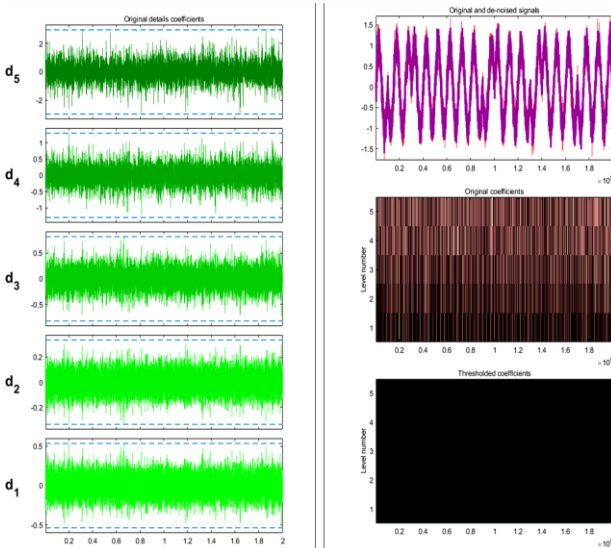


Рис. 7. Фильтрация ФКМ с помощью вейвлета Добеши

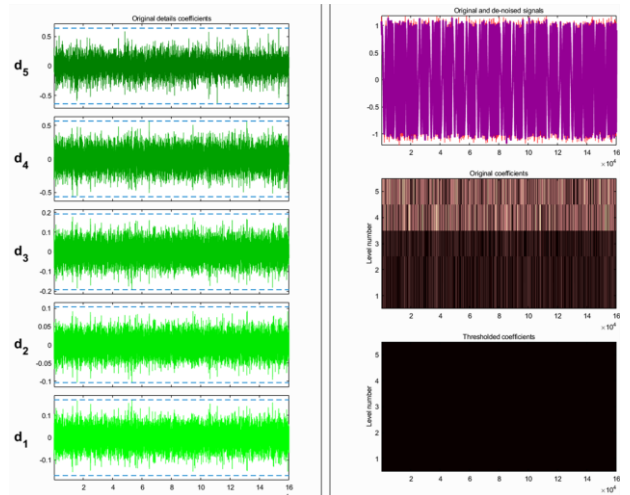


Рис. 8. Фильтрация ЛЧМ с помощью вейвлета Добеши

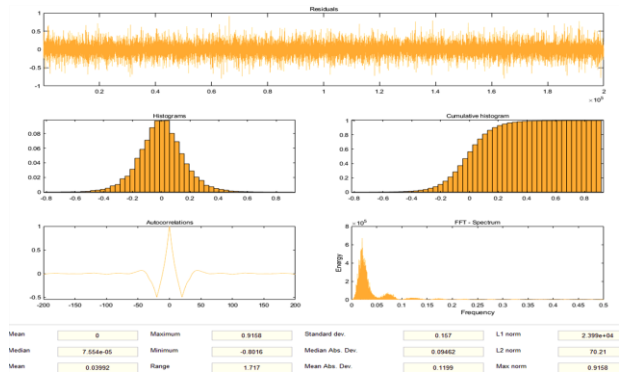


Рис. 9. Характеристики разности между исходным и очищенным сигналами ФКМ для вейвлета Хаара

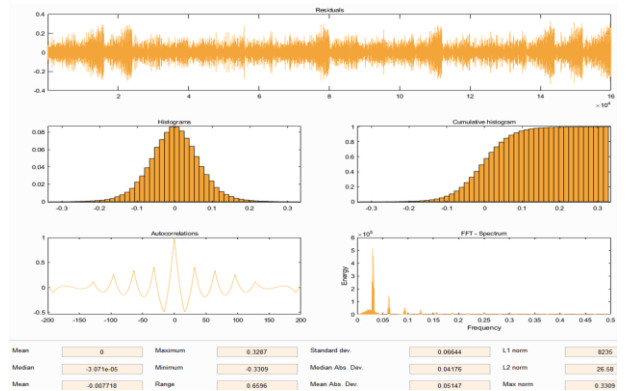


Рис. 10. Характеристики разности между исходным и очищенным сигналами ЛЧМ для вейвлета Хаара

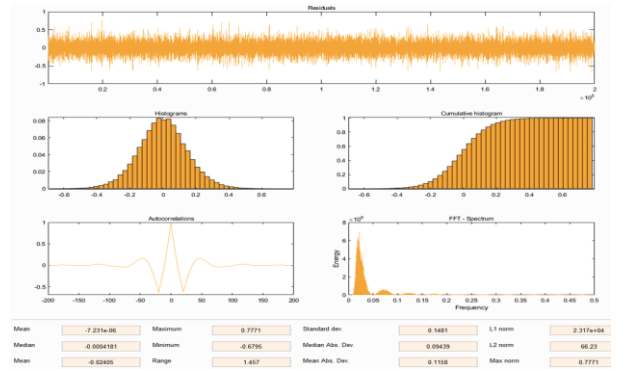


Рис. 11. Характеристики разности между исходным и очищенным сигналами ФКМ для вейвлета Добеши

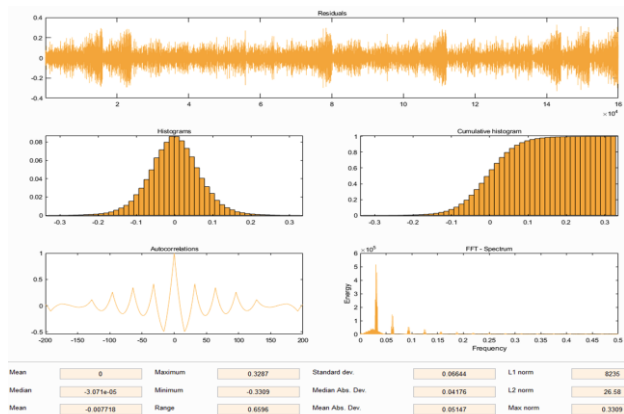


Рис. 12. Характеристики разности между исходным и очищенным сигналами ЛЧМ для вейвлета Добеши

Результаты статистических оценок распределений «шумов» сведены в таблицу сравнения вейвлет-фильтрации сигналов ФКМ и ЛЧМ вейвлетами Хаара, Добеши, Симлета и Фейера.

**Сравнение вейвлет-фильтрации сигналов ФКМ и ЛЧМ разными вейвлетами**

ФКМ	Вейвлет			
	Хаара	Добеши	Симлета	Фейера
Значение	0,916	0,777	0,735	0,744
Maximum	0,916	0,777	0,735	0,744
Standart dev.	0,157	0,148	0,1487	0,1497
ЛЧМ	Вейвлет			
	Хаара	Добеши	Симлета	Фейера
Значение	0,329	0,251	0,244	0,250
Maximum	0,329	0,251	0,244	0,250
Standart dev.	0,0664	0,0517	0,0517	0,053

По результатам сравнения разных типов вейвлет видно, что отфильтрованные сигналы ФКМ и ЛЧМ

вейвлетом Симлета имеют наименьшие значения максимума и СКО распределения «остатков после фильтрации», т.е. можно считать, что этот вейвлет наиболее эффективный.

Проведена обработка РЛ-сигналов на основе вейвлет-преобразований. Проведена разработка алгоритмов программ вейвлет-фильтрации РЛ-сигналов с ФКМ и ЛЧМ, исследована эффективность фильтрации сигналов вейвлетами Хаара, Добеши, Симлета, биортогональным вейвлетом и вейвлетом Фейера. Разработаны структуры алгоритмов программ вейвлет-фильтрации РЛ-сигналов.

*Литература*

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – 3-е изд., перераб. и доп.: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012.
2. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2021. – 452 с.
3. Голиков А.М., Рябинин Е.А., Кузьменко Ю.Д. Экспериментальные исследования и вейвлет-фильтрация сигналов морского радиолокатора на фоне взволнованной морской поверхности // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2012. – С. 49–52.

**Шинкевич Елена Александровна**  
 Студентка каф. РТС ТУСУРа  
 Эл. почта: e.a.shinkevich@mail.ru



*Секция 20*

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

*Председатель секции – Ходашинский Илья Александрович,  
профессор каф. КИБЭВС, д-р техн. наук*



УДК 004.021

М.Б. Бардамова

## Отбор и настройка весов признаков метаэвристическими алгоритмами в нечетких классификаторах несбалансированных данных

Проведение отбора признаков при построении нечеткого классификатора позволяет уменьшить сложность итоговой модели, что приводит к ускорению формирования вывода и облегчению понимания логики предоставляемого результата. Удаление шумовых признаков может способствовать увеличению точности классификации и снижению риска переобучения. Однако инструменты отбора признаков, функционирующие в режиме «обертки», предоставляют информацию о признаках исключительно в категориях «важен» и «не важен»; в реальности же признаки могут в разной степени влиять на получение значения выходной переменной. В данной работе отбор признаков сравнивается с настройкой весовых коэффициентов признаков, отражающих степень важности переменных в базе правил нечеткого классификатора. Для отбора используется бинарный алгоритм прыгающих лягушек, в роли алгоритма настройки применяется гибридный из непрерывных метаэвристик «гравитационный поиск» и «прыгающие лягушки». Эффективность инструментов проверяется на 36 наборах несбалансированных данных из репозитория «Knowledge Extraction based on Evolutionary Learning». Результаты сравнения показывают, что значимого статистического различия в средней геометрической точности между классификаторами, оптимизированными двумя исследуемыми подходами, не существует, но имеется значимое различие между качеством классификации до и после оптимизации.

**Ключевые слова:** нечеткий классификатор, алгоритм прыгающих лягушек, алгоритм гравитационного поиска, отбор признаков, настройка весовых коэффициентов признаков.

Построение нечетких классификаторов несбалансированных данных является актуальной задачей, так как многие реальные данные характеризуются дисбалансом – наличием неодинакового количества образцов различающихся классов. Например, в известном репозитории «Knowledge Extraction based on Evolutionary Learning» (KEEL) в разделе «Стандартные данные для классификации» [1], насчитывающем 75 наборов данных из различных сфер деятельности, только 23 имеют коэффициент дисбаланса (отношение количества образцов наибольшего класса к числу экземпляров наименьшего) ниже 1,5. Для остальных 52 наборов он варьируется от 1,6 до 140395.

Для преодоления проблемы дисбаланса применяется либо исправление данных (удаление экземпляров наибольших классов или генерация искусственных экземпляров наименьших), либо изменение способа оценки качества модели и доработка процесса построения классификатора. Одним из наиболее полезных способов улучшения качества классификации является отбор информативных признаков (feature selection). Он заключается в выборе из всего входного пространства такого подмножества, которое обладало бы меньшим количеством элементов при сопоставимой или большей точности по сравнению с полным набором. Сформированное подмножество должно быть достаточным для адекватного представления всех классов, присутствующих в обучающих выборках. Самым результативным способом отбора, с помощью которого гарантированно находится лучшее решение, является полный перебор, однако с ростом количества признаков многократно возрастают затраты ресурсов и времени на вычисления. Поэтому разрабатываются такие методы, которые позволяют найти оптимальное решение за меньшее время. Одним из наиболее распространенных способов отбора

является применение алгоритмов оптимизации в режиме обертки решающего алгоритма. Алгоритмы обертки, в роли которых чаще всего используются эвристики или метаэвристики [2], оценивают каждое подмножество признаков на основе качества построенной на нем модели и подбирают подмножество признаков, релевантное заданному классификатору.

Существуют исследования, посвященные разработке алгоритмов отбора признаков для несбалансированных данных. В работах [3, 4] при реализации схемы обертки используются фитнес-функции, основанные на средней геометрической точности. Отмечается, что качество распознавания наименьшего класса улучшается по сравнению с традиционной фитнес-функцией, основанной на общей точности. Авторы [5] применяют меру симметричной неопределенности для взвешивания признаков в зависимости от метки класса, чтобы выявить наиболее важные атрибуты для наиболее редких классов. Для поиска оптимальной комбинации среди признаков с наибольшими весами используется гармонический алгоритм. Несмотря на присутствие этапа взвешивания признаков, выходом алгоритма является бинарный вектор, где ноль означает отсутствие признака в обучении классификатора, единица – за его использование. Однако есть небольшое количество исследований, где признаки не только отбираются, но и взвешиваются. В рамках нечетких систем такой подход ранее применялся только для самообучающихся нечетких классификаторов [6] и не затрагивал задачу обработки дисбаланса данных.

Цель данной работы заключается в сравнении эффективности алгоритма отбора признаков и алгоритма настройки весовых коэффициентов признаков при построении нечетких классификаторов несбалансированных данных.

### Бинарный алгоритм прыгающих лягушек

Метаэвристика «прыгающие лягушки» отличается высокой скоростью работы и небольшим количеством настраиваемых параметров. В работе [7] предложено 15 модификаций этого алгоритма для адаптации к бинарному пространству поиска. При исследовании эффективности «прыгающих лягушек» в задаче отбора признаков для нечетких классификаторов на 21 наборе стандартных данных лучшие результаты показала версия бинаризации, построенная на комбинации V-образной функции трансформации с функцией слияния. В данной статье для сравнения будет использована именно эта модификация.

Популяция агентов – входных бинарных векторов  $\mathbf{S} = \{s_0, \dots, s_{N-1}\}$  – формируется случайным образом ( $N$  – размер популяции). Размерность каждого агента совпадает с количеством признаков в данных. Если элемент вектора равен единице, то соответствующий признак участвует в классификации; в случае равенства элемента нулю признак исключается. На основе каждого агента происходит построение нечеткого классификатора для оценки целевой функции  $\text{fit}(s_i)$ , где  $i \in [0, N)$ .

Алгоритм сортирует популяцию по убыванию фитнес-функции, разбивает на равные группы, внутри каждой из которых заданное количество итераций происходит локальный поиск. На первом шаге вычисляется вектор скорости на основе суммы двух слагаемых: разности лучшего и худшего агентов в группе, умноженной на случайный непрерывный вектор (с элементами в пределах от нуля до единицы), и разности глобально лучшего вектора и худшего агента в группе, также умноженной на непрерывный вектор. Далее полученный вектор скорости подается на вход V-образной функции трансформации, с помощью которой осуществляется формирование промежуточного агента **new**:

$$\text{Если } r < \left| v_d / \sqrt{1 + v_d^2} \right|, \text{ то } \mathbf{new}_d = 1, \text{ иначе } \mathbf{new}_d = 0,$$

где  $r$  – случайное число, равномерно распределенное от нуля до единицы,  $v_d$  –  $d$ -й элемент вектора скорости,  $\mathbf{new}_d$  –  $d$ -й элемент бинарного вектора **new**,  $d \in [1, M]$ ,  $M$  – количество признаков. Для промежуточного вектора рассчитывается фитнес-функция; если она оказывается больше, чем фитнес-функция худшего в группе агента, то временный вектор заменяет собой худший. В противном случае осуществляется переход ко второму этапу.

На втором этапе вектор **new** генерируется заново, но вместо **best**( $t$ ) используется глобально лучший вектор  $x_0$ . Если и в этом случае условие  $\text{fit}(\mathbf{new}) \geq \text{fit}(\mathbf{worst}(t))$  не выполняется, то на третьем этапе на месте **worst**( $t$ ) создается вектор случайным образом. Если замена не происходит, то **new** проходит через операцию слияния с глобальным лидером: элементы векторов поэлементно сравниваются, совпадающие остаются в **new**, остальные заполняются с помощью генерации случайного числа от нуля до единицы. Если оно меньше или равно 0,5, то значение элемента из агента **new** сохраняется. В противном

случае на этом месте будет выставлен элемент из лучшего вектора. Если и эта операция не позволяет улучшить худший агент, то он заменяется случайно сгенерированным бинарным вектором.

После окончания локальных итераций внутри всех групп агенты собираются в одну популяцию, и весь процесс повторяется снова до достижения счетчика глобальных итераций заданного значения. На выход алгоритм подает бинарный вектор признаков с максимальной фитнес-функцией.

При генерации агентов проводится проверка на возникновение «пустого» вектора. Если все элементы вектора равняются нулю, то случайно выбранный элемент заменяется единицей.

### Гибридный непрерывный алгоритм из метаэвристик «гравитационный поиск» и «прыгающие лягушки»

В работе [8] был предложен алгоритм настройки весовых коэффициентов признаков для нечетких классификаторов несбалансированных данных, основанный на использовании гибрида из метаэвристик «гравитационный поиск» и «прыгающие лягушки», функционирующего в непрерывном режиме. Задача алгоритма заключается в нахождении оптимального вектора весов признаков, где вес – вещественное число в пределах от нуля до единицы, отражающее степень важности признака при определении класса.

Алгоритм принимает на вход популяцию векторов, сгенерированную случайным образом, и рассчитывает фитнес-функцию. Затем осуществляется расчет масс агентов, векторов ускорения и скорости в соответствии с идеей метаэвристики «гравитационный поиск» [8]. Полученные векторы скорости складываются с соответствующими им агентами исходной популяции, фитнес-функция обновляется, осуществляется сортировка агентов по убыванию их качества.

Далее популяция разбивается на группы и проводится локальный поиск, взятый из метаэвристики «прыгающие лягушки». Внутри каждой группы заданное число итераций генерируется промежуточный вектор. На первом этапе – путем линейной композиции худшего и лучшего векторов в группе, на втором используются худший в группе и глобально лучший агент. Если фитнес-функция промежуточного вектора превосходит таковую у худшего вектора в группе, промежуточный вектор замещает собой худший и итерация локального поиска заканчивается. В противном случае осуществляется случайная генерация вектора.

После истечения локальных итераций внутри всех групп популяция объединяется, и весь процесс повторяется заново до окончания глобальных итераций. Выходом алгоритма является вектор с лучшей функцией качества.

Для улучшения возможности сокращения числа признаков при проведении их взвешивания был введен этап проверки веса. Если значение весового коэффициента признака оказывается меньше заданного порога  $\omega$ , он принудительно приравняется к нулю. Как следствие, признак исключается из классификации. Кроме того, добавлена процедура нормали-

зации вектора весов в соответствии с минимаксной нормализацией, чтобы один из весов гарантированно равнялся единице.

**Эксперимент**

Построение структуры нечеткого классификатора было осуществлено с помощью алгоритма экстремальных значений признаков классов, формирующего по одному правилу на каждый класс. Были использованы функции трансформации гауссова типа. Наборы несбалансированных данных для экспериментов получены из открытого репозитория KEEL (keel.es). В качестве фитнес-функции применялась средняя геометрическая точность.

Результаты построения нечетких классификаторов продемонстрированы в табл. 1. Здесь *IR* – коэффициент дисбаланса данных, *F* – количество признаков в исходном наборе данных, *GM* – средняя геометрическая точность, *F\** – количество признаков после отбора, *W* – сумма весовых коэффициентов признаков.

В табл. 2 представлены результаты попарного сравнения результатов критерием Уилкоксона. Нулевая гипотеза гласит, что между результатами отсутствует статистически значимое различие на уровне значимости, равном 0,05. Если значение стандартизированной статистики критерия положительное, то результаты первого сравниваемого этапа превосходят этапы второго.

Средняя геометрическая точность, полученная при использовании двух разных алгоритмов, оказалось сопоставима (с небольшим превосходством алгоритма отбора признаков). И алгоритм отбора, и алгоритм настройки признаков позволили достичь существенного статистического различия в точности по сравнению с исходным нечетким классификатором, построенным алгоритмом экстремальных значений признаков классов. Только три набора данных из тридцати шести – haberman, newthyroid2 и newthyroid1 – показали лучшую среднюю геометрическую точность на этапе генерации структуры.

Таблица 1

Усредненные по 10 выборкам результаты нечетких классификаторов

Данные	IR	F	Генерация структуры	Отбор признаков		Взвешивание признаков	
				GM	F*	GM	W
glass1	1,82	9	40,5	<b>61,5</b> ± 0,0	3,2 ± 0,1	60,4 ± 0,8	2,4 ± 0,2
ecoli0vs1	1,86	7	88,8	<b>97,1</b> ± 0,3	4,8 ± 0,2	96,7 ± 0,2	3,2 ± 0,3
wisconsin	1,86	9	73,4	<b>92,0</b> ± 0,0	5,9 ± 0,2	<b>92,0</b> ± 0,0	3,7 ± 0,2
pima	1,87	8	55,6	64,4 ± 0,0	3,2 ± 0,0	<b>64,5</b> ± 0,4	2,1 ± 0,1
glass0	2,06	9	60,1	76,9 ± 0,4	4,2 ± 0,2	<b>77,5</b> ± 0,7	2,9 ± 0,2
yeast1	2,46	8	39,6	60,2 ± 0,0	4,6 ± 0,2	<b>60,4</b> ± 0,5	2,8 ± 0,2
haberman	2,78	3	<b>44,3</b>	43,6 ± 0,0	1,5 ± 0,3	43,6 ± 0,0	1,4 ± 0,1
vehicle2	2,88	18	40	<b>72,4</b> ± 1,3	4,0 ± 0,4	70,3 ± 1,5	2,5 ± 0,3
vehicle1	2,90	18	41,9	<b>65,1</b> ± 0,9	4,1 ± 0,2	61,3 ± 1,3	2,3 ± 0,2
vehicle3	2,99	18	39,1	<b>60,4</b> ± 1,0	2,6 ± 0,4	58,6 ± 1,1	1,6 ± 0,3
glass0123/456	3,20	9	87,6	<b>90,9</b> ± 0,0	5,2 ± 0,2	89,6 ± 1,1	3,2 ± 0,3
vehicle0	3,25	18	55,5	<b>71,9</b> ± 1,0	5,2 ± 0,3	70,0 ± 0,7	3,5 ± 0,5
ecoli1	3,36	7	80,8	<b>89,3</b> ± 0,1	2,3 ± 0,3	<b>89,3</b> ± 0,1	1,7 ± 0,1
newthyroid2	5,14	5	<b>99,2</b>	98,2 ± 0,1	3,7 ± 0,1	98,9 ± 0,2	2,4 ± 0,2
newthyroid1	5,14	5	<b>99,2</b>	98,8 ± 0,1	3,6 ± 0,1	98,8 ± 0,1	2,3 ± 0,1
ecoli2	5,46	7	34,2	<b>86,5</b> ± 0,1	5,3 ± 0,1	86,4 ± 0,2	3,4 ± 0,2
segment0	6,02	19	88,1	<b>97,1</b> ± 0,2	6,5 ± 0,3	95,7 ± 0,6	3,7 ± 0,3
glass6	6,38	9	22,8	<b>88,5</b> ± 0,2	2,7 ± 0,2	78,9 ± 5,6	1,9 ± 0,2
yeast3	8,10	8	85,5	<b>89,6</b> ± 0,0	3,9 ± 0,2	89,5 ± 0,4	2,8 ± 0,4
ecoli3	8,60	7	50,8	<b>86,5</b> ± 0,1	4,9 ± 0,2	86,2 ± 0,4	3,1 ± 0,1
page-blocks0	8,79	10	63,6	69,9 ± 0,0	2,0 ± 0,0	<b>75,4</b> ± 3,4	1,3 ± 0,2
yeast2vs4	9,08	8	67,3	<b>86,9</b> ± 0,0	4,4 ± 0,1	86,8 ± 0,7	2,8 ± 0,1
yeast05679vs4	9,35	8	61,9	71,7 ± 0,0	2,3 ± 0,2	<b>72,5</b> ± 1,1	1,5 ± 0,1
vowel0	9,98	13	83,9	<b>89,7</b> ± 0,1	8,1 ± 0,2	<b>89,7</b> ± 0,3	5,1 ± 0,4
glass2	11,59	9	10,8	<b>39,4</b> ± 0,0	3,4 ± 0,1	38,3 ± 4,3	2,1 ± 0,2
glass4	15,46	9	23,1	<b>58,7</b> ± 0,0	2,4 ± 0,2	28,3 ± 8,4	2,2 ± 0,3
ecoli4	15,80	7	68,7	<b>92,2</b> ± 0,9	4,3 ± 0,2	91,3 ± 1,1	2,9 ± 0,2
page-blocks13vs2	15,86	10	75,1	<b>90,3</b> ± 0,1	6,0 ± 0,3	89,4 ± 2,1	3,4 ± 0,3
abalone9-18	16,40	7	58,7	74,8 ± 0,0	3,3 ± 0,2	<b>76,1</b> ± 1,3	2,4 ± 0,2
yeast1458vs7	22,10	8	45,8	49,5 ± 1,7	4,6 ± 0,4	<b>50,6</b> ± 1,3	3,4 ± 0,3
yeast2vs8	23,10	8	68,8	<b>75,9</b> ± 0,0	3,2 ± 0,0	74,8 ± 1,1	2,2 ± 0,2
yeast4	28,10	8	65,7	<b>69,7</b> ± 1,2	4,0 ± 0,4	68,5 ± 0,4	2,8 ± 0,2
yeast1289vs7	30,57	8	54,1	60,5 ± 0,9	3,5 ± 0,2	<b>61,2</b> ± 0,3	2,4 ± 0,2
yeast5	32,73	8	72,9	<b>93,7</b> ± 0,4	6,4 ± 0,1	93,6 ± 0,9	3,9 ± 0,2
ecoli0137vs26	39,14	7	0	<b>51,7</b> ± 0,1	3,6 ± 0,2	58,9 ± 9,2	2,4 ± 0,2
yeast6	41,40	8	51,2	<b>78,0</b> ± 0,7	6,7 ± 0,2	77,8 ± 0,9	3,6 ± 0,2
Среднее		9,4	58,3	<b>76,2</b> ± 0,3	4,1 ± 0,2	75,0 ± 1,5	2,7 ± 0,2



Результаты сравнения критерием Уилкоксона различных этапов построения нечеткого классификатора

Сравниваемые этапы	Метрика	Асимптотическая значимость	Стандартизированная статистика критерия	Нулевая гипотеза
Генерация структуры и отбор признаков	$GM$	$< 0,001$	-5,212	Отклоняется
	$F$ и $F^*$	$< 0,001$	-5,304	Отклоняется
Генерация структуры и настройка весов признаков	$GM$	$< 0,001$	-5,212	Отклоняется
	$F$ и $W$	$< 0,001$	-5,304	Отклоняется
Отбор признаков и настройка весов признаков	$GM$	0,55	1,921	Принимается
	$F^*$ и $W$	$< 0,001$	-5,305	Отклоняется

Если сравнить среднюю геометрическую точность, полученную двумя алгоритмами оптимизации, видно, что точность различается в пределах двух процентов за исключением пяти наборов данных: vehicle1 (4% в пользу отбора признаков), glass6 (10 процентов в пользу отбора), page-blocks0 (шесть процентов в пользу взвешивания признаков), glass4 (тридцать процентов в пользу отбора) и esoli0137vs26 (7% в пользу настройки весов).

Сравнение полученных весов признаков с количеством признаков нельзя считать полностью корректным. Однако учитывая тот факт, что вектор весов признаков является нормированным, можно заключить следующее. Если бы алгоритм настройки весов не справлялся со своей задачей и присваивал признакам одинаковые веса, они все равнялись бы единице и совпадали со значениями, представленными в столбце  $F$  табл. 1. Но ни в одном наборе данных такая ситуация не наблюдается. С другой стороны, при получении очень маленького веса признак исключался из классификации; следовательно, полученные значения  $W$ , близкие к единице, означают, что в наборе осталось немногим больше одного признака. Однозначно назвать такой результат отрицательным или положительным нельзя, так как всё зависит от конкретного набора данных.

### Заключение

Проведенное исследование было посвящено сравнению двух близких стратегий оптимизации нечеткого классификатора: отбора признаков бинарным алгоритмом в режиме обертки и настройки весов признаков непрерывным алгоритмом. Для отбора был использован алгоритм прыгающих лягушек с V-образной функцией трансформации на первом шаге локального поиска и функцией слияния на втором. Настройка весов производилась гибридным алгоритмом из метаэвристик «гравитационный поиск» и «прыгающие лягушки».

Результаты эксперимента показали, что оба алгоритма способны улучшать среднюю геометрическую точность нечетких классификаторов при сокращении числа признаков. Лучшие результаты по точности были достигнуты бинарным алгоритмом отбора признаков; алгоритм настройки весов показал чуть более скромные, но близкие результаты. При работе над конкретной задачей классификации разработчику модели стоит испробовать оба подхода, так как на различных данных алгоритмы могут по-разному проявить себя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках научных проектов, выполняемых коллективами научно-исследовательских лабораторий образовательных учреждений высшего профессионального образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, номер проекта FEWM-2020-0042.

### Литература

1. Standard classification data sets. Knowledge extraction based on evolutionary learning [Электронный ресурс]. – URL: <https://sci2s.ugr.es/keel/category.php?cat=clas> (дата обращения: 10.10.2020).
2. Ходашинский И.А. Применение ранжирования и схем кроссвалидации при отборе признаков для нечеткого классификатора / И.А. Ходашинский, Ф.Е. Анфилофьев, М.Б. Бардамова и др. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2018. – № 2 (10). – С. 31–41.
3. Du Lm. Feature selection for multi-class imbalanced data sets based on genetic algorithm / Lm. Du, Y. Xu, H. Zhu // Annals of Data Science. – 2015. – Vol. 2. – P. 293–300.
4. Application of the gravitational search algorithm for constructing fuzzy classifiers of imbalanced data / M. Bardamova, I. Hodashinsky, A. Konev, A. Shelupanov // Symmetry. – 2019. – № 11. – P. 1458.
5. Feature selection for high dimensional imbalanced class data using harmony search / A. Moayedikia, K.-L. Ong, Y.L. Boo et al. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2017. – Vol. 57. – P. 38–49.
6. Lughofer E. On-line incremental feature weighting in evolving fuzzy classifiers / E. Lughofer // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – Vol. 163, No. 1. – P. 1–23.
7. Бардамова М.Б. Способы адаптации алгоритма прыгающих лягушек к бинарному пространству поиска при решении задачи отбора признаков / М.Б. Бардамова, А.Г. Буймов, В.Ф. Тарасенко // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 57–62.
8. Bardamova M. Hybrid Algorithm for Tuning Feature Weights in a Fuzzy Classifier / M. Bardamova, I. Hodashinsky // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – IEEE, 2021. – P. 0354–0357.

### Бардамова Марина Борисовна

М.н.с. лаб. съема, анализа и управления биологическими сигналами ИСИБ ТУСУРа  
ORCID (0000-0002-0567-590X)  
Эл. почта: 722bmb@gmail.com

УДК 004.0023

Е.А. Чистякова

## Метаэвристика tree-seed algorithm для решения задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора

Рассматривается метаэвристика Tree-Seed algorithm (TSA), выбранная для встраивания в нечеткий классификатор с целью оптимизации параметров. Также в статье представлены результаты экспериментов после встраивания и статистическое сравнение с другими метаэвристиками.

**Ключевые слова:** метаэвристика, оптимизация, Tree-Seed algorithm, нечеткий классификатор.

В анализе данных одной из самых популярных и распространенных задач является задача классификации. Она возникает в самых различных сферах жизни: медицина, экономика, техническое обеспечение и др. Уже на данный момент создано большое количество алгоритмов классификации [1]. Но все же большинство из них работает по принципу «черного ящика». Это делает невозможным явно интерпретировать закономерности, которые приводят к отнесению объекта классификации к различным классам.

Этот недостаток отсутствует у нечеткого классификатора [2]. Он представляет собой инструмент интеллектуального анализа данных, позволяющий одновременно проводить классификацию и извлекать экспертные знания, связанные с процессом классификации. Здесь каждое нечеткое правило – это знание, которое может быть интерпретировано на языке, который легко воспринимается человеком.

При построении нечетких систем важным этапом является решение задачи определения оптимальных параметров этих систем. Процедура оптимизации параметров antecedent-правил или «тонкой» настройки выполняется методами, основанными на производных, алгоритмами роевого интеллекта или эволюционных вычислений [3–10]. В данной работе для оптимизации параметров планируется использовать метаэвристический алгоритм Tree-Seed Algorithm.

### Tree-Seed Algorithm

Tree-Seed Algorithm (TSA) – это популяционный алгоритм непрерывной оптимизации, созданный Кираном в 2015 г. [11].

Метаэвристика TSA реализует поиск оптимума на основе размножения деревьев с помощью своих семян [12].

Процесс поиска можно разделить на две фазы. В первой фазе происходит задание входных параметров, таких как размер начальной популяции деревьев ( $N$ ), размерность задачи ( $D$ ) и поисковая тенденция ( $ST$ ). В этой же фазе определяется условие останова, генерируется начальная популяция из  $N$  деревьев в  $D$ -мерном пространстве и определяется лучшее дерево в начальной популяции ( $B_j$ ).

Во второй фазе определяется количество семян для создания новой популяции ( $ns$ ) для каждого дерева, после этого генерируется новая популяция. Далее происходит сортировка агентов. После сортировки получается вектор, где первым стоит лучшее полученное дерево в данной популяции. Если лучшее

полученное дерево лучше, чем  $B_j$ , то  $B_j$  принимает значение лучшего дерева. Эти действия выполняются, пока не будет достигнуто условие останова.

### Подбор параметров

Так как в процессе работы алгоритм вынужден обращаться к полученным ранее параметрам деревьев для получения новой популяции, а также генерировать и сохранять параметры новых деревьев, приходится работать с большим массивом данных. Это влияет на время работы алгоритма и на объем необходимой памяти, затрачиваемой данным алгоритмом в процессе его работы.

Для того чтобы оптимизировать работу алгоритма, было принято решение выбрать  $ns$  равным 10% от начальной популяции для всех деревьев. Большее количество новых семян значительно увеличивает время работы и объем затрачиваемой памяти, а меньшее количество семян ухудшает качество полученных результатов.

Также проводился подбор параметра  $ST$ . Данный параметр влияет на способ получения потомства от существующей популяции деревьев. Для этого алгоритм генерирует случайное число в диапазоне  $[0; 1]$ . Если сгенерированное число меньше, чем заданный параметр  $ST$ , то для получения нового семени дерево-родитель скрещивается с лучшим деревом на данный момент, а если больше  $ST$ , то со случайным. Для этого был проведен эксперимент с помощью трех наборов данных. Алгоритм запускался по 10 раз для  $ST$ , изменяющегося в диапазоне  $[0,1; 0,9]$  с шагом 0,1. Далее результаты усреднялись и выбиралось то значение параметра  $ST$ , при котором получалось наименьшее значение ошибки.

В результате данного эксперимента был выбран параметр  $ST = 0,5$ . Это позволяет обеспечить равновероятный выбор как лучшего, так и случайного дерева для формирования новой популяции. Также алгоритм не переходит в режим случайного поиска или в заикливание на скрещивании с лучшим деревом, что может повлечь за собой «застревание» в локальных оптимумах.

### Эксперимент и его результаты

Тестирование алгоритма проводилось на пятнадцати наборах данных. Алгоритм запускался 10 раз, количество итераций устанавливалось равным 500, начальная популяция состояла из 40 агентов. Параметр  $ST$  был взят равным 0,5. Результаты представлены в таблице.

## Результаты эксперимента

Dataset	TrainBefore	TrainAfter	TestBefore	TestAfter	Time
banana	53,19	21,61	53,42	22,42	85,99
ecoli	54,13	22,4	54,8	25,38	63,67
glass	49,94	28,67	50,54	36,11	57,51
heart	32,67	11,09	32,96	17,85	35,85
ionosphere	20,39	5,55	20,24	9,5	61,61
newthyroid	4,19	0,09	4,59	3,26	27,68
phoneme	25,27	18,79	25,15	19,76	94,74
pima	32,93	20,02	34,52	23,53	36,89
segment	19,74	10,55	19,52	11,14	186,67
sonar	42,63	13,41	42,76	28,73	90,85
spambase	60,58	10,73	60,58	11,05	367,53
spectfheart	19,56	12,83	19,12	18,99	72,156
vehicle	70,13	38,36	70,1	42,87	81,06
vowel	56,78	45,23	56,16	50,99	152,72
wdbc	7,42	1,83	8,09	4,43	62,68

TrainBefore и TestBefore – ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках соответственно до начала оптимизации параметров с помощью метаэвристического алгоритма, т.е. после построения структуры алгоритмом экстремальных значений признаков классов. TrainAfter и TestAfter – усредненная ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках после применения оптимизации.

Из представленных в таблице результатов можно сделать вывод, что метаэвристика TSA показывает хороший результат. В результате работы метаэвристического алгоритма ошибка определения экземпляра к нужному классу уменьшается как на обучающих выборках, так и на тестовых.

**Заключение**

В результате проведенного эксперимента можно заметить, что метаэвристический алгоритм TSA оптимизирует параметры классификатора таким образом, что ошибки отнесения объекта к классу уменьшаются, по сравнению с ошибками до оптимизации параметров.

Таким образом, можно сделать выводы, что метаэвристика TSA справляется с задачей оптимизации параметров нечеткого классификатора.

*Литература*

1. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин // Финансы и статистика. – 1989. – Т. 3. – С. 607.

2. Ishibuchi H. Performance evaluation of fuzzy classifier systems for multidimensional pattern classification problems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics / H. Ishibuchi, T. Nakashima, T. Murata. – 1999. – Part B: Cybernetics 29(5). – P. 601–618.

3. Prado R.P. Rules discovery in fuzzy classifier systems with PSO for scheduling in grid computational infrastructures / R.P. Prado, S. Garcia-Galan, M.J.E. Exposito. – 2015. – № 29. – P. 424–435.

4. Gorzalczany M.B. A multi-objective genetic optimization for fast, fuzzy rule-based credit classification with balanced accuracy and interpretability/ M.B. Gorzalczany, F. Rudzinski. – 2016. – № 40. – P. 206–220.

5. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем на базе алгоритма имитации отжига и методов, основанных на производных // Информационные технологии. – 2012. – № 3. – С. 14–20.

6. Antonelli M. An experimental study on evolutionary fuzzy classifiers designed for managing imbalanced datasets / M. Antonelli, P. Ducange, F. Marcelloni. – 2014. – № 146. – P. 125–136.

7. Fazzolari F. A multi-objective evolutionary method for learning granularities based on fuzzy discretization to improve the accuracy-complexity trade-off of fuzzy rule-based classification systems: D-MOFARC algorithm / F. Fazzolari, R. Alcalá, F. Herrera. – 2014. – № 24. – P. 470–481.

8. Ходашинский И.А. Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии / И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 10. – С. 15–20.

9. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем на основе прямого алгоритма муравьиной колонии / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – № 3. – С. 26–33.

10. Ходашинский И.А. Параметрическая идентификация нечетких моделей на основе гибридного алгоритма муравьиной колонии / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // Автоматика. – 2008. – № 5 (44). – С. 24–35.

11. An implementation of tree seed algorithm (TSA) for constrained optimization / M.S. Kiran, K. S. Phon-Amnuaisuk, W. Engchuan, J.H. Chan // IES. – 2016. – P. 189–197.

12. Чистякова Е.А. Метаэвристика Tree-Seed Algorithm для поиска минимума математических функций // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР. – Томск: В-Спектр, 2021. – № 2. – С. 187–189.

**Чистякова Екатерина Андреевна**  
Студентка каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: katyachisty@yandex.ru

УДК 004.02

В.С. Ерохин

## Тестирование метаэвристики Moth search algorithm для решения задачи оптимизации параметров термов нечеткого классификатора

Рассмотрены нечеткая логика, понятие классификатора и этапы его построения, а также приведены результаты тестирования нечеткого классификатора с метаэвристикой Moth search algorithm.

**Ключевые слова:** метаэвристика, Moth search algorithm, набор данных, нечеткий классификатор.

Нечеткая логика берет свое начало в 1965 г. из работ профессора Л. Заде [1]. Нечеткая логика была изобретена для обработки неопределенных и неточных знаний и принятия решений [2].

Популярность нечеткой логике принесла проблема того, что многие современные задачи управления и классификации не могут быть решены классическими методами из-за большой сложности математических моделей, которые их описывают [3], поэтому решение задачи классификации, основанное на использовании нечеткой логики, отличается от таких методов, как нейронные сети, дискриминантный анализ и деревья решений, наиболее легкой возможностью интерпретации благодаря использованию базы правил и лингвистических термов [4].

Одним из типов нечетких систем является нечеткий классификатор.

Целью работы является исследование эффективности метаэвристики Moth search algorithm для настройки параметров термов нечеткого классификатора с целью повышения качества классификации, а также сравнение алгоритма с аналогами.

### Нечеткий классификатор

Нечеткий классификатор – алгоритм классификации, основанный на извлечении нечетких правил из массивов данных либо экспертных мнениях [5].

Недостатком большинства существующих алгоритмов классификации является невозможность явной интерпретации закономерностей, приводящих к отнесению объекта классификации к тому или иному классу. Нечеткий классификатор лишен такого недостатка [6], представляя базу нечетких правил, каждое из которых представляет собой знание, доступное для прямого восприятия экспертом в соответствующей проблемной области. Таким образом, основным достоинством нечеткого классификатора является то, что пользователю понятны полученные правила, а результат может быть интерпретирован в терминах, понятных человеку [7], а также отсутствие допущений, необходимых для статической классификации [8].

Нечеткий классификатор состоит из ЕСЛИ-ТО правил с нечеткими антецедентами (ЕСЛИ-часть) и метками класса в консеквентах (ТО-часть). Антецедентные части правил разбивают входное пространство признаков на множество нечетких областей, а консеквенты задают выход классификатора, помечая эти области меткой класса [9]. Исходя из данного

описания, можно определить, что правила нечеткого классификатора имеют следующий вид [10]:

$R_{ji}$  : Если  $x_1 = A_{i1}$  И  $x_2 = A_{i2}$  И  $x_3 = A_{i3}$  И ... И  $x_n = A_{in}$ , то class =  $c_j$ .

В процессе нечеткой классификации объект относится к каждому классу с определенной степенью принадлежности, а выходом классификатора является метка класса [11].

Этапы построения нечетких классификаторов можно представить следующим образом [12]:

- отбор релевантных признаков;
- формирование структуры классификатора;
- настройка параметров функции принадлежности.

Первый этап в виде отбора признаков направлен на снижение размерности исходного признакового пространства данных. Процедура отбора позволяет как уменьшить размерность задачи, так и избавиться от избыточных признаков и минимизировать переобучение классификатора, что поспособствует повышению качества классификации и уменьшению вычислительных затрат [13].

На втором этапе определяется количество правил и производится их отнесение к классам. Наиболее часто для этой цели используются методы кластеризации на основе c-means.

Процедура оптимизации параметров антецедентов правил на третьем этапе выполняется, как правило, при помощи метаэвристик [13]. На данном этапе была применена метаэвристика Moth search algorithm [14]. Данная метаэвристика основана на поведении моли или мотылька, которые стремятся долететь до источника света. Основными характеристиками моли или мотылька в данной метаэвристике являются фототаксис и случайные движения. Смысл фототаксиса заключается в полете к источнику света с целью приближения к нему, а в результате приближения к источнику света применяются случайные движения при помощи полетов Леви [14].

### Эксперимент и его результаты

Данная метаэвристика была адаптирована для работы с нечетким классификатором на языке программирования Python, а затем протестирована на 15 наборах данных.

Для тестирования применялись количество агентов, равное 40, и количество итераций, равное 500.

Основными значениями являются такие, как TrainBefore и TestBefore – ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках соответственно до начала оптимизации параметров, т.е. после построения структуры алгоритмом экстремальных значений признаков классов, а также TrainAfter и TestAfter – усредненная ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках после применения оптимизации.

Результаты тестирований представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Результаты тестирований Train

Train	TrainBefore	TrainAfter		
		Среднее	Min	Max
banana	53,19	31,416	30,26	32,79
ecoli	54,13	35,708	34,52	37,56
glass	49,94	39,914	38,36	42,72
heart	32,67	20,792	19,88	21,32
ionosphere	20,39	14,746	13,04	16,56
newthyroid	4,19	2,584	2,43	2,69
phoneme	25,27	21,964	21,73	22,08
pima	32,93	24,74	24,31	25,13
segment	19,74	15,014	14,84	15,23
sonar	42,63	21,88	21,15	22,65
spambase	60,58	22,554	21,38	23,5
spectfheart	19,56	16,38	15,48	16,94
vehicle	70,13	55,374	54,31	56,58
vowel	56,78	49,53	49,27	49,91
wdbc	7,42	4,348	4,24	4,59

Таблица 2

Результаты тестирований Test

Test	TestBefore	TestAfter		
		Среднее	Min	Max
banana	53,42	32,114	30,45	33,6
ecoli	54,8	37,882	34,53	40,77
glass	50,54	46,466	44,35	50,47
heart	32,96	27,26	23,33	29,63
ionosphere	20,24	17,094	15,94	18,52
newthyroid	4,59	4,804	3,68	6,47
phoneme	25,15	22,65	22,04	23,08
pima	34,52	26,288	25,25	27,33
segment	19,52	15,852	15,24	16,49
sonar	42,76	34,22	32,26	37,55
spambase	60,58	23,278	22,56	24,24
spectfheart	19,12	21,04	17,96	22,46
vehicle	70,1	59,116	55,42	62,29
vowel	56,16	53,374	51,21	54,65
wdbc	8,09	6,366	5,62	6,86

По результатам тестирования классификатора вместе с метаэвристикой Moth search algorithm были посчитаны средние значения, а также максимальные и минимальные.

Метаэвристика справляется с улучшением работы классификатора на этапе тренировки и всегда улучшает его работу, что является главным показателем ее работоспособности. На этапе тестирования в паре наборов данных newthyroid и spectfheart значения ухудшились. Причиной этому может стать сильный разброс между усредненными значениями наборов данных, что может говорить о переобучении и как

следствие ухудшения результатов на этапе тестирования.

### Статистическое сравнение различных метаэвристик

В результате полученных результатов после проведения эксперимента было проведено статистическое сравнение при помощи критерия Фридмана.

Таблица 3

Сравнение по критерию Фридмана

№	TrainAfter	
1	YOYO Blind Man	1,63
2	Tree Seed Algorithm	2,27
3	Crow Search Algorithm	2,97
4	Black Hole Algorithm	3,13
5	Moth Search Algorithm	5,00
№	TestAfter	
1	Tree Seed Algorithm	1,87
2	Crow Search Algorithm	2,57
3	YOYO Blind Man	2,67
4	Black Hole Algorithm	3,33
5	Moth Search Algorithm	4,57

По представленному выше сравнению можно заметить, что метаэвристика Moth search algorithm практически всегда находится либо на 4-м, либо на 5-м месте среди представленных для сравнения остальных метаэвристик, но при этом лучше работы классификатора без применения метаэвристики, что крайне важно, так как это подтверждает, что метаэвристика справляется с задачей оптимизации параметров термов нечеткого классификатора.

### Заключение

В результате полученных данных можно сказать, что алгоритм справляется с задачей оптимизации параметров термов, вследствие чего улучшает точность, а также выполняет это за приемлемое время.

Относительно других метаэвристик Moth search algorithm всегда находится на последних позициях, но в случае возникновения ситуации, когда помимо точности также будет важно время, с такой задачей данная метаэвристика справится лучше, чем такие метаэвристики, как Tree Search Algorithm и YOYO Blind Man, так как данные метаэвристики выполняют аналогичную работу намного дольше.

### Литература

1. Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1–3 // Information Sciences. – No. 8. – P. 199–249. P. 301–357; No. 9. – P. 43–80.
2. Zadeh L.A. Fuzzy Logic // IEEE Computer. – 1988. – P. 83–93.
3. Гриняев С. Нечеткая логика в системах управления // Компьютерра. – 2001. – № 38.
4. Ходашинский И.А. Методы построения трехкритериальных парето-оптимальных нечетких классификаторов // И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – № 2. – С. 75–87.
5. Сергиенко Р.Б. Метод формирования нечеткого классификатора самонастраивающимися коэволюционными алгоритмами // Искусственный интеллект и принятие решений. Мягкие вычисления. – 2010. – С. 98–106.
6. Ishibuchi H. Performance evaluation of fuzzy classifier systems for multidimensional pattern classification problems //

Н. Ishibuchi, Т. Nakashima, Т. Murata // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1999. – Vol. 29. – P. 601–618.

7. Горбунов И.В. Методы построения трехкритериальных паретооптимальных нечетких классификаторов / И.В. Горбунов, И.А. Ходашинский // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – № 2. – С. 75–87.

8. Scherer R. Multiple Fuzzy Classification Systems // Studies in Fuzziness and Soft Computing. – 2012. – Vol. 288. – P. 132.

9. Мех М.А. Сравнительный анализ применения методов дифференциальной эволюции для оптимизации параметров нечетких классификаторов / М.А. Мех, И.А. Ходашинский // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 65–75.

10. Hodashinsky I.A. Identification of the parameters of fuzzy approximators and classifiers based on the cuckoo search algorithm / I.A. Hodashinsky, D.Y. Minina, K.S. Sarin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2015. – Vol. 51. – P. 234–240.

11. Ходашинский И.А. Метаэвристические методы оптимизации параметров нечетких классификаторов / И.А. Ходашинский, А.Е. Анфилофьев, М.Б. Бардамова,

В.С. Ковалев, М.А. Мех, О.К. Сонич // Information and mathematical technologies in science and management. – 2016. – № 1. – С. 73–81.

12. Ходашинский И.А. Методика построения компактных и точных нечетких систем типа Такаги–Сугено / И.А. Ходашинский, К.С. Сарин // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, №. 1.

13. Ходашинский И.А. Построение нечеткого классификатора на основе методов гармонического поиска / И.А. Ходашинский, М.А. Мех // Программирование. – 2017. – № 1. – С. 54–65.

14. Gai-Ge Wang. Moth search algorithm: a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems // Memetic Computing. – 2018. – Vol. 10. – P. 151–164.

---

**Ерохин Владимир Сергеевич**

Студент каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: vova.eroxin@gmail.com

К.К. Григорьев

## Применение алгоритма Нелдера–Мида в алгоритме роста дерева как метаоптимизатора при настройке нечеткого классификатора

Подробно исследована возможность применения алгоритма Нелдера–Мида для метаоптимизации и продемонстрировано его применение в задачах оптимизации параметров алгоритма роста дерева (TGA) для базовой задачи оптимизации нечеткого классификатора.

**Ключевые слова:** метаоптимизация, метаэвристика, алгоритм Нелдера–Мида, алгоритм роста дерева, Python, нечеткий классификатор.

При разработке новейших алгоритмов оптимизации в них закладываются свободные параметры, которые предоставляют широкий инструментарий для дальнейшей настройки и улучшения алгоритма. Вектор таких свободных параметров, принимаемых алгоритмом, называют его стратегией. Для конкретной задачи эффективность выбранной стратегии может значительно отличаться. На практике настройка параметров алгоритма часто выполняется экспертами эмпирическим методом, что требует значительных затрат временных и вычислительных ресурсов. Чтобы определить оптимальную стратегию за разумное время, необходимо решить задачу метаоптимизации. В таких задачах настраиваемый алгоритм определяют как базовый, а настраивающий алгоритм – как метаалгоритм или метаоптимизатор. В качестве таких применяются: метаэвристические алгоритмы, байесовская оптимизация, метод локальной одномерной выборки, метод градиентного спуска, алгоритм Нелдера–Мида и алгоритм Хука–Дживса. Целью данной работы является изучение алгоритма Нелдера–Мида и возможности его применения для оптимизации стратегий базового алгоритма роста дерева.

### Алгоритм роста дерева

Алгоритм роста дерева (TGA) – это популяционный метаэвристический алгоритм оптимизации, берущий за свою основу математическое представление процесса роста деревьев в лесу.

Рассматриваемый алгоритм состоит из следующих этапов [1]:

1) получить на вход популяции векторы параметров термов нечеткого классификатора  $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$  и вычислить их фитнес-функции;

2) определить лучшее решение  $\mathbf{T}_{GB}^j$  на  $j$ -й итерации на основе фитнес-функции;

3) определить  $N_1$  лучших решений, для последующего локального поиска по формуле

$$\mathbf{T}_i^{j+1} = \frac{\mathbf{T}_i^j}{\theta} + r\mathbf{T}_i^j, \quad (1)$$

где  $\theta$  – скорость снижения мощности деревьев, а  $r$  – коэффициент (от 0 до 1) скорости роста деревьев при поглощении питательных веществ;

4) определить  $N_2$  решений для их перемещения между ближайшими лучшими соседями. Чтобы определить расстояние между  $N_2$  решениями и  $N_1$  лучшими, использовали следующую формулу

$$d_i = \left( \sum_{i=1}^{N_1+N_2} (\mathbf{T}_{N_2}^j - \mathbf{T}_i^j)^2 \right)^{1/2} \quad \& \quad d_i = \begin{cases} \mathbf{T}_{N_2}^j \neq \mathbf{T}_i^j \rightarrow d_i \\ \mathbf{T}_{N_2}^j = \mathbf{T}_i^j \rightarrow \infty \end{cases}. \quad (2)$$

После чего нужно определить два решения  $x_1$  и  $x_2$  с наименьшим  $d_i$  и вычислить линейную комбинацию между ними, воспользовавшись формулой (3), где  $\lambda$  – случайный коэффициент (от 0 до 1) отклонения положения перемещенного решения между двумя лучшими соседями:

$$y = \lambda x_1 + (1-\lambda)x_2; \quad (3)$$

5) переместить полученное решение между двумя соседними по формуле (4), где  $\alpha_i$  – случайный коэффициент (от 0 до 1) отклонения угла перемещения:

$$\mathbf{T}_{N_2}^j = \mathbf{T}_{N_2}^j + \alpha_i y; \quad (4)$$

6) определить  $N_3$  худших решений и получить для замены случайные векторы параметров термов;

7) создать новую популяцию, которая определяется как  $N = N_1 + N_2 + N_3$ ;

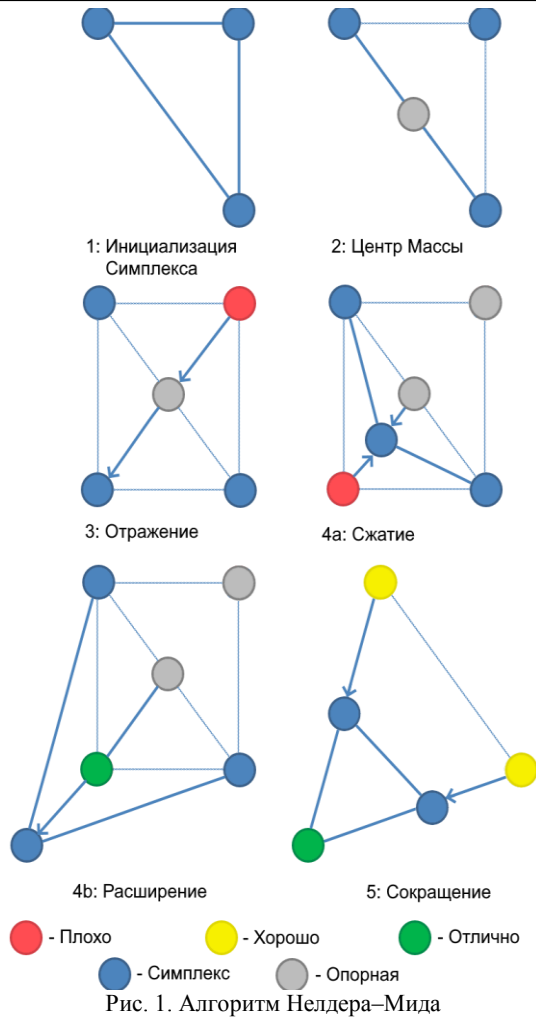
8) отсортировать новую популяцию. Тогда число  $N$  начальной популяции будет рассматриваться как начальная выборка для следующей итерации;

9) после выполнения условия останова на выходе алгоритма будет получен вектор параметров термов с лучшей фитнес-функцией.

Как и было упомянуто ранее, большая часть метаэвристических алгоритмов оптимизации, включая описанный выше, имеет набор свободных параметров, правильная настройка которых в рамках конкретной задачи значительно улучшает его эффективность. Для этой задачи был применен алгоритм Нелдера–Мида [2] в качестве метаоптимизатора.

### Алгоритм Нелдера–Мида

Алгоритм Нелдера–Мида – это метод оптимизации функции от нескольких переменных. В отличие от большинства эффективных алгоритмов оптимизации, в которых требуется вычисление градиентов, данный алгоритм ограничивается набором простых и «быстрых» операций. Метод надежен, эффективен и, как правило, показывает хорошие результаты [3]. Суть алгоритма заключается в определении симплекса и последующем воздействии на него посредством трех основных операций: отражение, растяжение и сжатие (рис. 1). Симплекс представляет собой  $n$ -мерный тетраэдр, являющийся  $n$ -мерным обобщением треугольника.



Рассматриваемый алгоритм в упрощенном виде выглядит следующим образом. На первом шаге выбираются три случайные точки и формируется симплекс. Затем вычисляются значения функции  $f(x, y)$  от двух координат  $x$  и  $y$  в каждой точке:  $f(V_1), f(V_2), f(V_3)$ . Точки сортируются по значениям в них функции  $f(x, y)$ , таким образом образуется двойное неравенство

$$f(V_2) \leq f(V_1) \leq f(V_3). \quad (5)$$

Так как задачей является минимизация фитнес-функции, то на данном шаге лучшей является та точка, в которой значение функции минимально. Для простоты отображения точки были переименованы следующим образом:  $b(\text{отлично}) = V_2, g(\text{хорошо}) = V_1, w(\text{плохо}) = V_3$ .

На следующем этапе определяется середина отрезка между точками  $g$  и  $b$

$$\text{mid} = \frac{g+b}{2}. \quad (6)$$

Затем применяется операция отражения, для этого находится точка  $V_r$  (7), т.е. точка  $w$  отражается относительно  $\text{mid}$ , где в качестве коэффициента  $\alpha$  обычно выбирается 1:

$$V_r = \text{mid} + \alpha(\text{mid} - w). \quad (7)$$

Получившаяся точка подставляется в фитнес-функцию, если  $f(V_r) < f(g)$ , то точка считается хоро-

шей. Затем принимается попытка увеличить расстояние в 2 раза для нахождения лучшей точки, т.е. применяется операция растяжения и находится точка  $V_e$  (8). В качестве коэффициента принимается  $\gamma = 2$ , т.е. расстояние будет увеличено в 2 раза.

$$V_e = \text{mid} + \gamma(x_r - \text{mid}). \quad (8)$$

Затем, если  $f(V_e) < f(b)$ , то получившаяся точка  $V_e$  является лучшей по сравнению с  $V_r$ . Затем точка  $w$  заменяется на  $V_e$ . Если хороших точек найдено не было, то производится операция сжатия, где требуется уменьшить отрезок и искать хорошие точки внутри симплекса (9). Коэффициент  $\beta$  принимается равным 0,5, что означает положение точки  $V_c$  на середине отрезка между точками  $w$  и  $\text{mid}$ .

$$V_c = \text{mid} + \beta(w - \text{mid}). \quad (9)$$

Также предусмотрена ещё одна операция – сокращение (shrink). В рассматриваемом случае происходит переопределение симплекса, что означает избавление от всех точек, кроме лучшей. Остальные точки определяются по формуле (10). Коэффициент  $\delta$  принимается равным 0,5, что по сути является передвижением точек к текущей лучшей точке.

$$x_j = b + \delta(x_j - b). \quad (10)$$

Алгоритм прекращает свою работу при достижении предельных значений следующих величин:

- количество итераций;
- площадь симплекса;
- точность.

#### Реализация алгоритма

Как и в большинстве эвристических методов, не существует идеального способа выбора инициализирующих точек. Использовать можно и случайные точки, близкие друг к другу для формирования симплекса. Конкретные реализации алгоритма отличаются в различных математических пакетах.

В данной работе алгоритм Нелдера–Мида был реализован при помощи свободно распространяемого математического пакета SciPy [4] для языка программирования Python. Затем метаоптимизатор был встроен в базовый алгоритм, организующий оптимизацию нечеткого классификатора.

Для проведения тестирования мета-оптимизатора с ресурса Keel dataset [5] были загружены 3 набора данных с 10-кратной кроссвалидацией: balance, vira, rima.

Перед началом тестирования в программе были выставлены следующие значения параметров:

- размер начальной популяции  $n\_popul = 40$ ;
- количество потоков  $n\_jobs = 5$ ;
- число итераций базового алгоритма  $\text{max\_iter} = 100$ .

Были выбраны 3 исходные стратегии  $S_n = [N_1, N_2, L, \theta]$ , где  $L$  – число локальных поисков, и использованы для каждого из трех наборов данных:

- $S_1 = [10, 25, 10, 1]$ ;
- $S_2 = [15, 15, 10, 2]$ ;
- $S_3 = [15, 20, 10, 5]$ .

В качестве исследуемой величины был использован процент ошибки классификации, которая явля-



ется величиной, обратной точности, где точность – это отношение числа правильно классифицированных экземпляров данных к общему числу экземпляров. Для эксперимента были проведены по 100 итераций алгоритма метаоптимизатора. Для отображения результата был выбран вывод для каждой пятой итерации.

Чтобы протестировать работоспособность метаоптимизатора, был проведен эксперимент на тестовом значении стратегии (рис. 2).

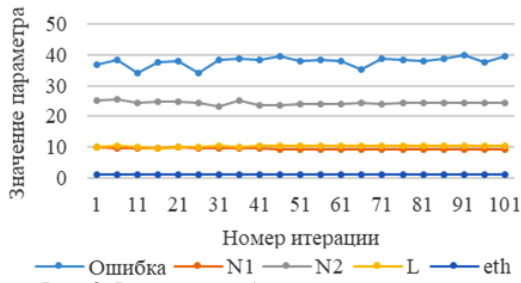


Рис. 2. Результат работы метаоптимизатора на данных balance

Как можно заметить, параметры изменяются крайне слабо, в то время как колебания ошибки классификации присутствуют. Это связано с тем, что результаты расчетов при оптимизации классификатора могут отличаться даже при одинаковых значениях параметров алгоритма оптимизации, в связи со случайностью выборки, округлением и прочими случайными коэффициентами.

Для сравнения результатов с другими метаэвристическими алгоритмами оптимизации были при тех же начальных условиях взяты популяционные алгоритмы прыгающих лягушек [6] (Leaping Frog Algorithm, LFA) и китовой стаи [7] (Whale Swarm Algorithm, WSA). Далее была рассмотрена картина при разных начальных условиях и данных (рис. 3–5).

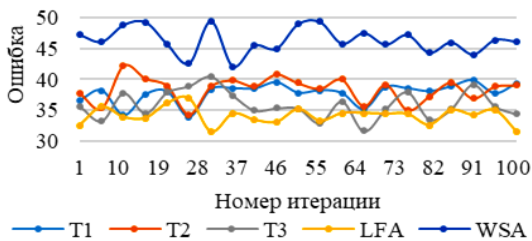


Рис. 3. Стратегии  $S_1, S_2, S_3$  на данных balance

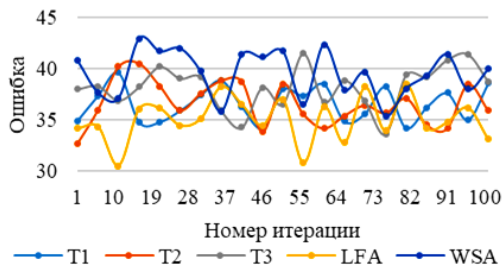


Рис. 4. Стратегии  $S_1, S_2, S_3$  на данных bura

В ходе экспериментов была исследована возможность применения алгоритма Нелдера–Мида в качестве метаоптимизатора.



Рис. 5. Стратегии  $S_1, S_2, S_3$  на данных pima

Результаты демонстрируют, что задачи, где выходное значение функции зависит не только от входных параметров, но и, например, от времени или случайных величин, не подходят для данного метода. Так или иначе алгоритм работает, но слишком малое отклонение от исходной стратегии не позволяет компенсировать колебания ошибки классификации. Также из прошлого замечания следует, что процесс подбора оптимальных параметров происходит крайне медленно, а в случае с базовым алгоритмом требуется ещё и целочисленное представление результата, что ещё больше замедляет и ухудшает работу алгоритма Нелдера–Мида. Различные средние значения ошибки классификации при использовании различных стратегий показывают, что изменение параметров влияет на качество работы базового алгоритма.

#### Литература

1. Карпенко А.П. Основные сущности популяционных алгоритмов для задачи глобальной оптимизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 2. – С. 8–18.
2. Fuchang G., Lixing H. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters [Электронный ресурс] // Springer Science+Business Media. – 2010. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/225691623\\_Implementing\\_the\\_Nelder-Mead\\_simplex\\_algorithm\\_with\\_adaptive\\_parameters](https://www.researchgate.net/publication/225691623_Implementing_the_Nelder-Mead_simplex_algorithm_with_adaptive_parameters) (дата обращения: 04.09.2021).
3. Kelly C.T. Iterative Methods for Optimization [Электронный ресурс] // Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia. – 1999. – URL: [https://archive.siam.org/books/textbooks/fr18\\_book.pdf](https://archive.siam.org/books/textbooks/fr18_book.pdf) (дата обращения: 07.05.2021).
4. Описание пакета SciPy. – URL: <https://www.scipy.org/about.html> (дата обращения: 4.06.2021).
5. Репозиторий стандартных наборов данных для классификации. – URL: <http://keel.es> (дата обращения: 03.09.2021).
6. Ковалев В.С., Бардамова М.Б. Оптимизация параметров нечеткого классификатора алгоритмом прыгающих лягушек [Электронный ресурс] // Проект ГПО-1404 «Нечеткие классификаторы обнаружения вторжений». – URL: <https://storage.tusur.ru/files/36463.pdf> (дата обращения: 02.03.2021).
7. Majdi M., Seyedali M. Whale optimization approaches for wrapper feature selection // Applied Soft Computing. – 2018. – № 62 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494617306695> (дата обращения: 4.09.2021).

**Григорьев Кирилл Константинович**

Студент каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: kirill.grigoryev1998@gmail.com

УДК 004.896

А.А. Загородская, И.А. Ходашинский

## Формирование наборов данных для нечеткой классификации адресов электронных ресурсов

Описан процесс формирования наборов данных с различным количеством признаков для классификации адресов электронных ресурсов (URL). Указанный процесс включает следующие этапы: формирование базы признаков для включения в набор данных, тестирование наборов данных с разным количеством признаков на нечетком классификаторе, анализ результатов классификации по двум критериям: качество ( $f$ -мера) и время классификации набора данных. В результате экспертного анализа был выбран набор данных с 47 признаками для задачи обнаружения вредоносного URL с высокой точностью и набор данных с 3 признаками для задачи обнаружения вредоносного URL с высокой скоростью обнаружения.

**Ключевые слова:** вредоносный URL, наборы данных, признаки, нечеткий классификатор.

Вредоносные ссылки – основной инструмент кибератак и мошенничества в интернете [1]. Переход по вредоносному URL может привести к краже личных данных и конфиденциальной информации, установке вредоносных программ, мошенничеству с кредитными картами, значительным финансовым и репутационным потерям как индивидуума или компании, так и страны в целом. Поэтому важно вовремя обнаруживать и блокировать данную атаку.

Большинство решений по обнаружению вредоносных URL основываются на их бинарной классификации на «вредоносные» и «легитимные». При этом многие методы требуют формирования набора данных, состоящего из значений признаков, указывающих на легитимность или вредоносность URL. Формирование базы признаков является важным этапом в обнаружении вредоносных ссылок, так как правильно подобранные признаки позволяют классификатору добиться высокой точности обнаружения [2]. Целью работы является формирование набора данных для определения вредоносности URL-адресов и его тестирование на нечетком классификаторе.

При этом под вредоносной ссылкой будем понимать URL-адрес, переход по которому может привести к успешной реализации фишинговой атаки или к исполнению вредоносного кода в системе. Под легитимной ссылкой (легитимным адресом) будем понимать ссылку, которая не относится к вредоносной ссылке (вредоносному адресу).

### Обзор подходов к формированию базы признаков URL

В ходе аналитического исследования подходов к формированию базы признаков URL [2–12] было выделено 202 признака. Признаки были проанализированы и разделены на четыре большие группы: 1) на основе строки URL, 2) на основе особенностей домена, 3) на основе содержания веб-страницы, 4) на основе поведения ресурса. В первой группе можно выделить такие подходы к формированию базы признаков, как нахождение в строке URL заданных слов или символов, подсчет символов, нахождение пропорций длин компонентов URL, выделение статических свойств URL или компонентов (например, признаки – длина URL, энтропия URL), выделение других свойств URL (например, признаки – является ли URL коротким, индекс Google). Ко второй группе

можно отнести подходы по анализу таких особенностей, как геолокация, свойства IP-адресов, информация WHOIS, скорость соединения. В третью группу входят такие подходы, как нахождение подозрительных слов в содержании веб-страницы, подсчет подозрительных тегов, выделение свойств страницы (например, признаки – размер и энтропия страницы), выделение свойств содержания страницы (например, признаки – наличие изображений, количество скрытых элементов). Четвертая группа содержит подходы по загрузке страницы и анализу её поведения (например, признаки – наличие всплывающего окна, загрузка внешних объектов).

Было выделено 107 признаков по следующим критериям: реализуемость, неповторяемость, понятность, возможность привести к целочисленному или вещественному типу данных. Критерий реализуемости означает, что признак можно сформировать за приемлемое время, например, значение признака «Количество ресурсов, которые отметили URL как вредоносный» можно получить с ресурса VirusTotal, но ограничение на количество проверяемых адресов приводит к значительному увеличению временных затрат на составление набора данных. Критерий неповторяемости означает, что не может быть два и более признака, несущих одинаковую смысловую нагрузку. В частности, критерий «Количество точек в URL» целочисленного типа включает в себя критерий «Наличие точки в URL» логического типа, поэтому оставляется только критерий «Количество точек в URL». Критерий понятности означает, что разработчик алгоритма формирования признаков понимает его сущность и может реализовать. Критерий возможности привести к целочисленному или вещественному типу данных можно привести на примере критерия «Жизненный цикл домена», который представляет собой информацию о регистрации и перерегистрации домена. Кроме этого, на основе данного критерия признаки логического типа (True, False) были приведены к бинарному типу (0 или 1).

### Формирование наборов данных URL с разным количеством признаков

Был разработан алгоритм, формирующий набор данных URL на основе набора URL-адресов. На вход алгоритма поступает набор URL, состоящий из текстовых строк URL и значения класса, и выполняются следующие действия.

Формируется массив данных размером  $M \times 108$ , где  $M$  – количество URL в наборе данных: из каждой текстовой строки URL выделяется 107 признаков; вектор признаков дополняется классом URL – 1 или 0 («вредоносный» или «легитимный»). Полученный набор данных URL записывается в файл с расширением csv.

В качестве входных данных для алгоритма был использован общедоступный набор URL 2016 г. размером в 285 426 URL-адресов [13], который представляет собой набор текстовых строк URL и соответствующих им классов: 1 или 0 («вредоносный» или «легитимный») с распределением 26,5 и 73,5% соответственно.

Так как признаки для реализации были выбраны из субъективных суждений и их достаточно много, был произведен отбор наиболее информативных признаков при помощи 6 методов. В результате отбора было получено 7 наборов данных: 1) с тремя признаками, выбранными методом LASSO [14]; 2) с семью признаками, имеющими умеренную и выше связь с классом URL по шкале Чеддока [15]; 3) с 45 признаками, не имеющими одинаковые значения в более чем 95% случаях; 4) с 57 признаками, не имеющими одинаковые значения в более чем 99% случаях; 5) с 97 признаками, выбранными методом обратного устранения (последовательного сокращения [16]); 6) с 47 признаками, полученными в результате сравнения предыдущих методов; 7) с 107 признаками (всеми признаками). За основу набора данных с 47 признаками были взяты признаки, не имеющие одинаковые значения в более чем 99% случаях. При сравнении учитывались корреляция признаков друг с другом и классом URL, неинформативные признаки, отобранные методом обратного устранения, и признаки, отобранные методом LASSO.

Стоит отметить, что признаки, входящие в набор данных с 3 признаками, входят в другие наборы данных за исключением набора данных с 8 признаками. К данным признакам относятся: время действия домена (в днях), срок действия домена (в днях), длина URL. В свою очередь, признаки, входящие в набор данных с 8 признаками, входят в остальные наборы данных. К данным признакам относятся: время действия домена (в днях), срок действия домена (в днях), количество перенаправлений на веб-странице, количество разрешенных IP-адресов, наличие домена в RBL (Real-time Blackhole List), количество случаев возникновения ситуаций: буква между двумя циф-

рами и цифра между буквами, наличие «.php» в URL. При этом признаки, входящие в набор данных с 45 признаками, не включаются в полном объеме в признаки, входящие в набор данных с 47 признаками.

#### Тестирование наборов данных и анализ результатов

Тестирование проводилось на сервере со следующими характеристиками: Intel Xeon E7-4809, 16 потоков, 32 ГБ ОЗУ.

Полученные наборы данных были протестированы на нечетком классификаторе со следующими параметрами: алгоритм генерации базы правил по экстремальным значениям признаков [17]; алгоритм роящихся частиц (АРЧ) [18] для отбора признаков; АРЧ для настройки параметров [19]; метрика качества –  $f$ -мера; кроссвалидация с разделением на 10 групп с сохранением соотношения классов;  $N$  (число агентов в популяции) – изменяемое значение (от 20 до 60 с шагом 10);  $I$  (максимальное количество итераций при отборе признаков и настройке параметров) – изменяемое значение (от 300 до 700 с шагом 100). В силу больших временных затрат было решено отказаться от классификации полного набора данных и уменьшить количество образцов в 10 раз с сохранением соотношения классов. Уменьшенный набор данных был протестирован на тех же параметрах нечеткого классификатора. Лучшие результаты классификации приведены в табл. 1.

Дополнительно было проведено тестирование на нечетком классификаторе на основе других алгоритмов, чтобы решить проблему застревания классификатора в локальном оптимуме при классификации набора данных с 97 и 107 признаками.

Лучшие результаты были получены при применении модифицированного алгоритма прыгающих лягушек для отбора признаков (МАПЛ) [20, 21] и серого волка (АСВ) [22] для оптимизации параметров термов нечеткого классификатора. Дополнительно было проведено тестирование уменьшенных наборов данных с применением вышесказанных методов. Лучшие результаты классификации приведены в табл. 2.

Лучшая оценка качества ( $f$ -мера) после оптимизации на тесте была достигнута на уменьшенном наборе данных с 47 признаками при применении МАПЛ для отбора признаков и АСВ для оптимизации параметров термов и составила 85,4%.

Таблица 1

Лучшие результаты классификации уменьшенного набора данных 1

Исходное кол-во признаков	$N$	$I$	Среднее значение $f$ -меры, %				Среднее кол-во отобранных признаков	Время классификации набора данных, с
			Обучение	Тест	После оптимизации на обучении	После оптимизации на тесте		
57	30	400	75,82	75,93	80,27	80,33	23,90	3613
57	60	700	76,08	76,15	80,64	80,42	21,90	11180
47	20	300	76,19	76,14	80,86	80,82	21,40	1445
47	30	400	76,25	76,26	81,68	81,32	21,90	2938
47	60	700	76,26	76,21	81,55	81,49	21,70	10067
47	40	500	76,28	76,20	81,78	81,86	20,90	4914
47	50	600	76,46	76,50	82,45	82,16	21,40	7366

Таблица 2

Лучшие результаты классификации уменьшенного набора данных 2

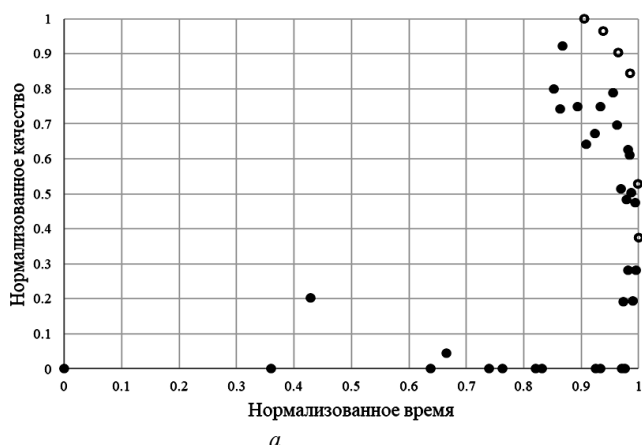
Исходное кол-во признаков	N	I	Среднее значение <i>f</i> -меры, %				Среднее кол-во отобранных признаков	Время классификации набора данных, с
			Обучение	Тест	После оптимизации на обучении	После оптимизации на тесте		
47	30	400	78,81	78,75	84,38	84,03	10,6	2484
107	50	600	77,88	77,95	84,29	84,08	13,0	8005
107	40	500	77,83	77,81	84,29	84,09	15,4	6122
107	60	700	78,07	77,94	84,80	84,64	12,7	10343
47	20	300	78,00	77,96	85,02	84,68	11,3	1395
47	50	600	78,69	78,68	84,78	84,70	10,6	5112
47	60	700	79,07	78,93	85,57	85,40	11,5	6808

Также на данном наборе данных достигалась лучшая оценка качества при использовании АРЧ для отбора признаков и оптимизации. Из этого можно сделать предположение, что уменьшенный набор данных с 47 признаками можно использовать для обнаружения вредоносного URL при использовании нечеткого классификатора.

Чтобы учесть второй критерий – время работы, был построен фронт Парето по двум критериям: *f*-мера, характеризующая качество решения, и время классификации набора данных. При этом для измене-

ния направленности критерия времени классификации была выполнена нормализация Сэвиджа. Для приведения к безразмерной шкале двух критериев была применена полная нормализация. На рис. 1 представлены фронты Парето результатов классификации уменьшенных наборов данных 1 и 2, где точка представляет собой результат классификации при определенном сочетании *N*, *I*, и количества признаков в наборе данных. Выколотыми точками отображаются оптимальные решения фронта Парето, характеристики которых представлены в табл. 3.

Фронт Парето результатов классификации 1



Фронт Парето результатов классификации 2

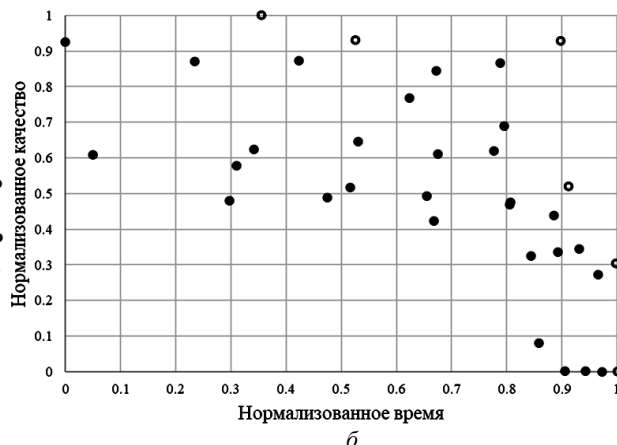


Рис. 1. Фронты Парето при использовании МАПЛ для отбора признаков и АСВ для оптимизации результатов классификации уменьшенных наборов данных – а; при использовании АРЧ для отбора признаков и оптимизации – б

Таблица 3

Характеристики оптимальных решений фронта Парето

Оптимальные решения фронта Парето результатов классификации уменьшенного набора данных при использовании АРЧ для отбора признаков и оптимизации параметров					Оптимальные решения фронта Парето результатов классификации уменьшенного набора данных при использовании МАПЛ для отбора признаков и АСВ для оптимизации параметров				
Кол-во признаков в наборе данных	N	I	Ср. оценка качества после опт. на тесте, %	Время классификации набора данных, с	Кол-во признаков в наборе данных	N	I	Ср. оценка качества после опт. на тесте, %	Время классификации набора данных, с
3	20	300	76,76	356	3 пр.	20	300	75,18	378
8	20	300	78,09	403	8 пр.	20	300	78,29	402
47	20	300	80,82	1 445	47 пр.	20	300	84,68	1 395
47	30	400	81,32	2 938	45 пр.	20	300	80,5	1 255
47	40	500	81,86	4 914	47 пр.	60	700	85,4	6 808
47	50	600	82,16	7 366	47 пр.	50	600	84,7	5 112

Анализ решений из множества Парето позволяет сделать вывод о том, что наименьшее время классификации достигается при использовании набора данных с 3 признаками при числе агентов в популяции,

равном 20, и максимальном количестве итераций, равном 300. Однако качество классификации в таком случае не является лучшим. Максимальное качество классификации достигается при использовании

набора данных с 47 признаками, при этом, регулируя  $N$  (число агентов в популяции) и  $I$  (максимальное количество итераций), можно добиться разного времени классификации. Также можно отметить, что для набора данных с 47 признаками лучше использовать МАПЛ для отбора признаков и АСВ для оптимизации параметров термов, так как в таком случае достигается лучшее качество при временных затратах меньше, чем при применении других алгоритмов.

#### Заключение

В процессе исследования были сформированы 7 наборов данных с разным количеством признаков URL, указывающих на легитимность или вредоносность URL, и протестированы на нечетком классификаторе с разными параметрами ( $N$  и  $I$ ). При этом в зависимости от цели работы классификатора (увеличение качества классификации или уменьшение времени) можно выбрать набор данных для достижения лучших результатов. Набор данных с 47 признаками позволит достичь высокой точности обнаружения вредоносного URL, набор данных с 3 признаками – достичь высокой скорости обнаружения вредоносного URL.

В качестве дальнейшего исследования будут предприняты попытки уменьшить наборы данных и протестировать получившиеся наборы на нечетком классификаторе. Помимо этого, предполагается протестировать наборы данных из признаков, которые были отобраны нечетким классификатором для одного набора данных при одном запуске, а также реализовать прямой отбор признаков [16] на нечетком классификаторе.

#### Литература

1. Специалисты назвали самые распространенные виды кибермошенничества в Рунете [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zpravzhaemschikov.ru/smi/2019-09-03>, свободный (дата обращения: 03.02.2021).
2. Shokan I. Detecting malicious URLs using lexical features and machine learning techniques. Project: Application of machine learning approaches in intrusion detection system, 2018, 69 pages [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27270.01601>, свободный (дата обращения: 27.02.2021).
3. Patil D.R. Feature-based Malicious URL and Attack Type Detection Using Multi-class Classification / D.R. Patil, J.B. Patil // *ISC Int'l Journal of Information Security*. – July 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 141–162.
4. Shahrivari V. Phishing Detection Using Machine Learning Techniques / V. Shahrivari, M. Mahdi Darabi, M. Izadi. – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2009.11116>, свободный (дата обращения: 14.03.2021).
5. Lin M.-S. Malicious URL Filtering – A Big Data Application / M.-S. Lin, C.-Y. Chiu, Y.-J. Lee, H.-K. Pao // *IEEE International Conference on Big Data*. – 2013. – P. 589–596.
6. Митюков Е.А. Модель обнаружения фишинговых атак на основе гибридного подхода для защиты автоматизированных систем управления производством / Е.А. Митюков, А.В. Затонский // *Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2020. – Т. 20 (2). – С. 55–66.
7. Mamun M.S.I. Detecting Malicious URLs Using Lexical Analysis / M.S.I. Mamun, M.A. Rathore, A.H. Lashkari, N. Stakhanova, A.A. Ghorbani // *International Conference on Network and System Security*. – 2016. – P. 467–482.
8. Hao S. PREDATOR: Proactive Recognition and Elimination of Domain Abuse at Time-Of-Registration / S. Hao, A. Kantchelian, B. Miller, V. Paxson, N. Feamster // *CCS'16: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. – 2016. – P. 1568–1579.
9. Seshagiri P. AMA: Static Code Analysis of Web Page for the Detection of Malicious Scripts / P. Seshagiri, A. Vazhayilb, P. Sriramb // *Procedia Computer Science*. – 2016. – Vol. 93 – P. 768–773.
10. Fukuda K. Detecting Malicious Activity with DNS Backscatter / K. Fukuda, J. Heidemann // *IMC '15: Proceedings of the 2015 Internet Measurement Conference*. – 2015. – P. 197–210.
11. Sahoo D. Malicious URL Detection using Machine Learning: A Survey / D. Sahoo, C. Liu, S. C.H. Hoi. – August 2019. – P. 1–37 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1701.07179.pdf>, свободный (дата обращения: 14.03.2021).
12. Zhauniarovich Y. A Survey on Malicious Domains Detection through DNS Data Analysis / Y. Zhauniarovich, I. Khalil, T. Yu, M. Dacier // *ACM Computing Surveys*. – May 2018. – Vol. 1, No. 1. – Article 1. – 35 p.
13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [dataset https://www.unb.ca/cic/datasets/url-2016.html](https://www.unb.ca/cic/datasets/url-2016.html), свободный (дата обращения: 28.09.2020).
14. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso // *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. – 1996. – No. 58(1). – P. 267–288.
15. Сизова Т.М. Статистика: учеб. пособие. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 190 с.
16. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания, основанные на алгоритме AdDel / Н.Г. Загоруйко, О.А. Кутненко // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 39–47.
17. Ходашинский И.А. Построение нечеткого классификатора на основе методов гармонического поиска / И.А. Ходашинский, М.А. Мех // *Программирование*. – 2017. – № 1. – С. 54–65.
18. Kennedy J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks*. – Perth: IEEE Service Center, 1995. – P. 1942–1948.
19. Ходашинский И.А. Идентификация параметров нечетких систем на основе адаптивного алгоритма роящихся частиц / И.А. Ходашинский, Д.С. Синьков // *Информационные технологии*. – 2011. – № 8. – С. 2–5.
20. Ходашинский И.А. Отбор признаков и построение нечеткого классификатора на основе алгоритма прыгающих лягушек / И.А. Ходашинский, М.Б. Бардамова, В.С. Ковалев // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2018. – № 1. – С. 76–84.
21. Ходашинский И.А. Модификации алгоритма прыгающих лягушек для отбора признаков в нечетком классификаторе при аутентификации пользователя по рукописной подписи / И.А. Ходашинский, М.Б. Бардамова // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2020. – № 4 (20). – С. 75–83.
22. Mirjalili S. Grey Wolf Optimizer / S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61.

**Загородская Александра Александровна**

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: shatrovaaleks@gmail.com

**Ходашинский Илья Александрович**

Д-р техн. наук, профессор каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: hodashn@gmail.com

Д.А. Андреевских, Р.Е. Коломников, К.С. Сарин

## Система аутентификации пользователя по динамической рукописной подписи

Описана система аутентификации пользователя по динамической рукописной подписи. Процесс аутентификации осуществляется на основе сравнения извлеченных сигналов подписи с эталоном. В качестве инструмента сравнения выступает метод опорных векторов. Проведена оценка точности полученной системы.

**Ключевые слова:** программный комплекс, аутентификация пользователя, рукописная подпись, классифицирующая модель.

Рукописная подпись остается одним из самых распространенных юридически значимых подтверждений личности на документе [1, 2]. Установка подлинности субъекта на основании подписи является актуальной задачей, поскольку средства проверки до сих пор работают в несовершенстве и атаки, такие как подделки, время от времени распознаются как оригинальные подписи [3–6]. Соответственно? существует необходимость разработки и реализации программного комплекса, который бы позволил проводить аутентификацию субъекта по рукописной подписи.

В связи с этим целью настоящей работы было разработать и реализовать программный комплекс, способный провести аутентификацию пользователя по рукописной подписи. Для достижения данной цели было выделено несколько задач: разработать концепцию аутентификации пользователя по рукописной подписи; создать обучающие данные: провести предобработку сигналов и извлечь признаки; создать классифицирующую модель на основе обучающих данных; разработать программный комплекс; оценить точность системы.

### Архитектура комплекса. Принцип работы

Концепцию работы комплекса (рис. 1) можно описать следующим образом. На вход поступают оригинальная подпись и проверяемая подпись в виде снятых сигналов, из которых затем по отдельности извлекается вектор признаков, характеризующих данную подпись. Непосредственно блоку принятия решения о подлинности проверяемой подписи предшествует подготовка признаков путем вычисления абсолютной разницы между соответствующими признаками оригинальной и проверяемой подписи. В результате на основе метода опорных векторов [7–9] выносится решение о подлинности подписи (подпись оригинальна – предоставить доступ, подпись поддельна – в доступе отказать).

### Преобразование сигналов

В общем случае в сигналах поступившей подписи могут наблюдаться разрывы, может различаться количество отсчетов и существовать разброс значений (рис. 2) [10, 11]. Чтобы избавиться от подобного, сигналы подписи подвергаются масштабированию, повороту и интерполированию кубическими сплайнами с количеством отсчетов 2 048 (рис. 3).

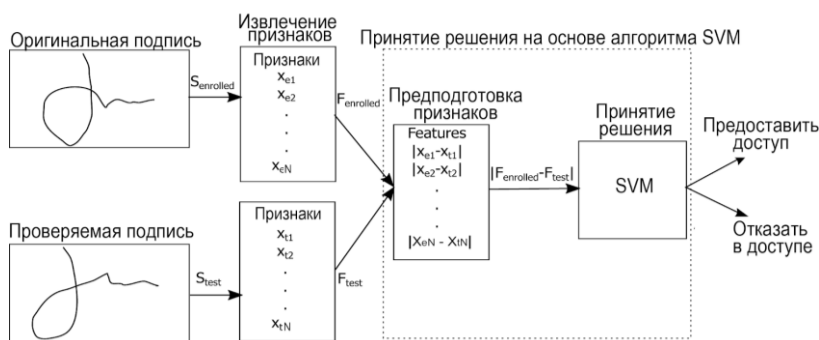


Рис. 1. Архитектура комплекса

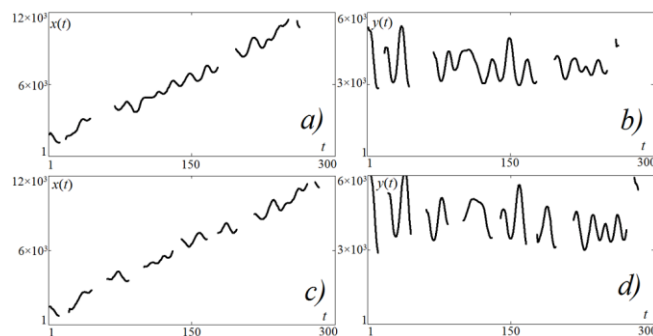


Рис. 2. Графики исходных сигналов подписи

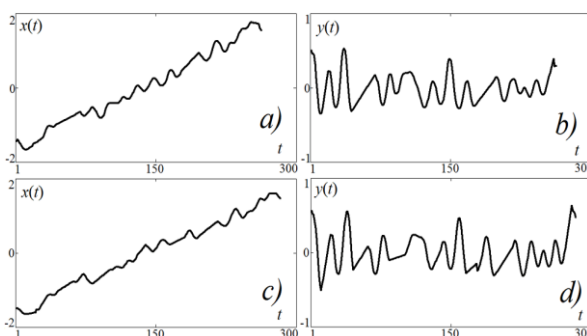


Рис. 3. Графики преобразованных сигналов подписи

### Извлечение признаков

На основе работы [12] был сформирован перечень из 87 извлекаемых признаков, среди которых среднее значение скорости нанесения подписи, максимальное ускорение и рывок, количество отрывов кончика пера от экрана планшета во время нанесения подписи, максимальное расстояние между точками подписи и т.д.

### Формирование таблицы наблюдений и классифицирующей модели

Для формирования таблицы наблюдений использовалась сторонняя база данных DeepSignDB [13], содержащая по 25 оригинальных и 25 поддельных подписей для каждого из 230 пользователей. Обучающая таблица содержит 175 столбцов и 15 000 строк. В каждой строке рассматриваются признаки пары подписей: первая подпись считается оригинальной, ее признаки занимают с 1-го по 8-й7 столбец, с 88-го по 174-й столбец расположены признаки проверяемой подписи, в 175-м столбце хранится значение метки класса: 0, если проверяемая подпись также являлась оригинальной, и 1, если проверяемая подпись являлась поддельной. В построении таблицы принимали участие как квалифицированные подделки (попытки повторить непосредственно оригинальную подпись), так и неквалифицированные (изображение другой подписи, отличной от оригинальной).

### Программный комплекс

Для работы с комплексом использовался планшет Wacom STU-540. Основными типами сигналов, которые он позволяет снимать, являются: координаты  $(x, y)$ , давление, оказываемое на поверхность, наличие прикосновения, а также выход пера за пределы дисплея.

Схема извлечения сигналов с планшета для электронной подписи в виде черного ящика, представлена на рис. 4. На вход подается положение пера на поверхности планшета, с которого будут извлекаться сигналы. Непосредственно исполнителями будут выступать автоматизированная система, а также администратор, контролирующий процесс снятия и запускающий программу. На выходе результат, а именно – извлеченные в текстовый файл сигналы.

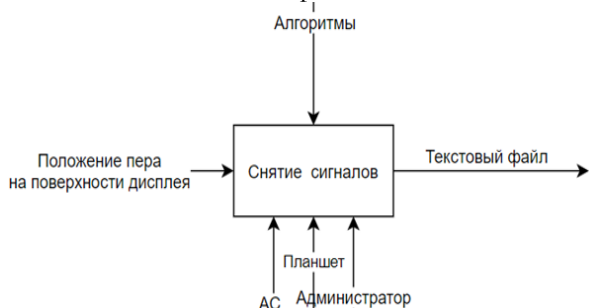


Рис. 4. Процесс извлечения сигнала в виде черного ящика

Программный комплекс был реализован в среде программирования Visual Studio на языке программирования C#. Для построения классификатора использовалась свободно распространяемая библиотека машинного обучения Accord. У данного программного комплекса есть 2 режима работы – извлечения сигнала и аутентификации.

### Режим извлечения сигналов

Для снятия оригинальной подписи необходимо либо создать пользователя, либо выбрать существующего в дереве, после чего откроется форма, в которой администратор выбирает необходимое количество записываемых оригинальных подписей. После чего пользователь осуществляет нанесение подписи.

На рис. 5 представлен файл с сигналами подписи. Первые 2 столбца отвечают за координаты  $(x, y)$ , далее идет время, давление, соприкосновения пера с поверхностью планшета и выход пера за пределы дисплея.

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка		
3982	1721	46466	198	1	1	
3982	1721	46471	226	1	1	
3982	1721	46476	261	1	1	
3982	1721	46481	300	1	1	
3964	1736	46486	326	1	1	
3945	1757	46491	357	1	1	
3918	1796	46496	379	1	1	
3883	1849	46501	397	1	1	
3843	1918	46506	414	1	1	
3799	2000	46511	430	1	1	
3761	2075	46516	446	1	1	
3727	2151	46521	460	1	1	
3694	2231	46526	472	1	1	
3661	2317	46531	483	1	1	
3626	2408	46536	494	1	1	
3591	2505	46541	501	1	1	
3554	2607	46546	508	1	1	
3518	2712	46551	512	1	1	
3484	2816	46556	512	1	1	
3454	2915	46561	511	1	1	
3431	3004	46566	509	1	1	
3416	3083	46571	506	1	1	
3408	3152	46576	504	1	1	
3408	3210	46581	504	1	1	
3414	3258	46586	503	1	1	

Рис. 5. Файл с оригинальной подписью

### Режим аутентификации

Второй режим работы позволяет проверить подлинность субъекта по наносимой им подписи. Проверка может осуществляться как по одной, так и нескольким подписям. Для этого необходимо выбрать в дереве пользователя, с которым идентифицировал себя субъект, и нажать на кнопку «Проверить», после чего откроется окно ввода подписи, далее программный комплекс принимает решение о том, прошел ли пользователь аутентификацию (рис. 6).

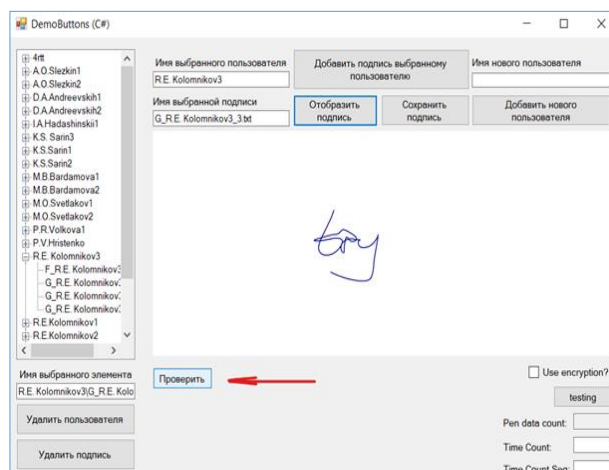


Рис. 6. Режим аутентификации

### Оценка точности системы

Было построено несколько классифицирующих моделей на основе разного количества задействованных признаков и метода формирования пар для обучающего файла:

- 33 признака со случайным формированием пар;
- 87 признаков со случайным формированием пар;
- 87 признаков с равномерным распределением пар.

Были проведены тесты для определения точности аутентификации для каждой классифицирующей модели. Тестирование проводилось для 1 000 экземпляров подписи. Результаты представлены на рис. 7.

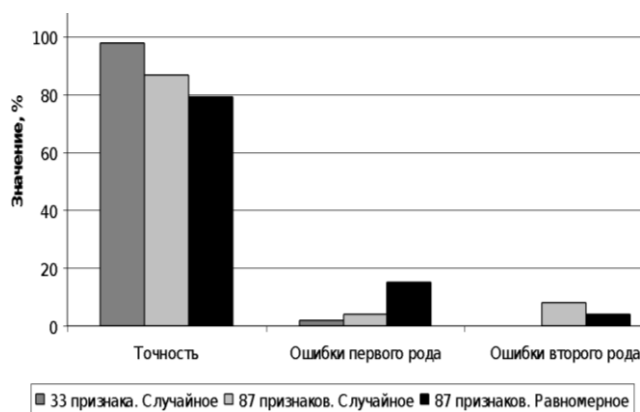


Рис. 7. Сравнение параметров точностей классифицирующих моделей

### Заключение

В результате проделанной работы был создан программный комплекс, позволяющий провести аутентификацию пользователя по рукописной подписи на основе трех оригинальных подписей и одной проверяемой подписи. Точность комплекса составила 90%, ошибка первого рода составила 3%, ошибка второго рода – 7%.

### Литература

1. Ходашинский И.А. Аутентификация пользователя по динамике подписи на основе нечеткого классификатора / И.А. Ходашинский, Е.Ю. Костюченко, К.С. Сарин, А.Е. Анфилофьев, М.Б. Бардамова, С.С. Самсонов, И.В. Филимонович // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 657–666.
2. Сарин К.С. Метод баггинга и отбор признаков в построении нечетких классификаторов для распознавания рукописной подписи / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 833–845.
3. Encyclopedia of Biometrics / ed. S.Z. Li, A.K. Jain. – Boston: Springer, 2015. – 1626 p.

4. Vorugunti C.S. OSVFuseNet: Online Signature Verification by feature fusion and depth-wise separable convolution based deep learning / C.S. Vorugunti, V. Pulabaigari, R.K. Gorthi, P. Mukherjee // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 409. – P. 157–172.
5. Song X.Y. Online Signature Verification Based on Stable Features Extracted Dynamically / X.Y. Song, X.H. Xia, F.J. Luan // IEEE Transactions on systems man cybernetics-systems. – 2017. – Vol. 47, No. 10. – P. 2663–2676.
6. Lai S.X. Recurrent Adaptation Networks for Online Signature Verification / S.X. Lai, L.W. Jin // IEEE Transactions on information forensics and security. – Vol. 14, No. 6. – P. 1624–1637.
7. Parodi M. Online Signature Verification: Improving Performance through Pre-classification Based on Global Features / M. Parodi, J.C. Gomez // Lecture Notes in Computer Science. – 2013. – Vol. 8158. – P. 69–76.
8. Jain A. Signature verification using geometrical features and artificial neural network classifier / A. Jain, S.K. Singh, K.P. Singh // Multimedia tools and applications. – 2020. – Vol. 79, No. 27-28. – P. 19993–20018.
9. Ahrabian K. Usage of autoencoders and Siamese networks for online handwritten signature verification / K. Ahrabian, B. BabaAli // Neural computing and applications. – 2019. – Vol. 31, No. 12. – P. 9321–9334.
10. Kholmatov A. Identity authentication using improved online signature verification method / A. Kholmatov, B. Yanikoglu // Pattern Recognition Letters. – 2005. – Vol. 26. – P. 2400–2408.
11. Yang L. Online handwritten signature verification based on the most stable feature and partition / L. Yang, X. Jin, Q. Jiang // Cluster Computing. – 2019. – Vol. 22. – P. 1691–1701.
12. Fierrez-Aguilar J. An On-line signature verification system based on fusion of local and global information / J. Fierrez-Aguilar, L. Nanni, J. Lopez-Penalba, J. Ortega-Garcia, D. Maltoni // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3546. – P. 523–532.
13. Tolosana R. DeepSign: Deep On-Line Signature Verification / R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, J. Ortega-Garcia // IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science – 2021. Vol. 3. – P. 229–239.

**Андреевских Дарья Алексеевна**  
Студентка каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: andreevskih.dar@yandex.ru

**Коломников Роман Евгеньевич**  
Студент каф. КСУП ТУСУРа  
Эл. почта: kolomnikov0405@gmail.com

**Сарин Константин Сергеевич**  
Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: sks@security.tomsk.ru



Д.Д. Мёдов

## Исследование эффективности метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm для решения задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора

Рассматривается способ оптимизации параметров термов нечеткого классификатора при помощи метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm. Эксперимент по оценке эффективности исследуемого метода построения нечеткого классификатора был проведен на наборах данных из репозитория Keel, также было произведено статистическое сравнение с другими алгоритмами оптимизации: Black Hole Algorithm, Tree-Seed Algorithm, Crow Search Algorithm, Moth Search Algorithm.

**Ключевые слова:** нечеткий классификатор, метаэвристика, Yo-Yo Blind Man Algorithm, критерий Фридмана.

В любой области науки существуют проблемы, которые не всегда можно решить при помощи классических методов из-за очень большой сложности математических моделей, которые описывают их. Для решения задач минимизации ошибки классификации данных используется нечеткая система. Чтобы увеличить точность системы, применяются алгоритмы оптимизации. Однако традиционные методы оптимизации сталкиваются с проблемами попадания в локальные оптимумы при поиске оптимального решения, поэтому предпочтение отдается метаэвристическим алгоритмам, которые обладают большей устойчивостью к этим проблемам.

Целью работы является исследование эффективности метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm для настройки параметров термов нечеткого классификатора с целью повышения качества классификации, а также сравнение алгоритма с аналогами.

### Нечеткий классификатор

С каждым годом возрастает интерес к задачам классификации, так как данные задачи являются одними из наиболее распространенных в анализе данных. В современном мире классификация применяется практически во всех сферах жизни, поэтому закономерно бурное развитие различных методов классификации.

Существуют такие методы классификации, как машины опорных векторов, нейронные сети, деревья решений, байесовские классификаторы, а также методы нечеткой классификации [1, 2].

Одним из видов нечетких систем является нечеткий классификатор.

Нечеткий классификатор – алгоритм классификации, основанный на извлечении нечетких правил из массивов данных. Каждое правило в нечетком классификаторе содержит значения лингвистических термов для всех информативных признаков (включая терм «игнорирования»), номер класса, которому соответствует данное правило, а также уровень значимости в интервале  $[0;1]$ , показывающий степень достоверности правила [3].

Формирование нечеткого классификатора сводится к задаче оптимизации – выбору наилучшей базы нечетких правил из множества существующих.

Основным преимуществом нечеткого классификатора перед другими алгоритмами классификации является то, что база нечетких правил представляет собой лингвистические знания, доступные для понимания и интерпретации экспертами в проблемной области решаемой задачи [4].

### Построение нечеткого классификатора

Процесс построения нечеткого классификатора состоит из трех основных задач:

- 1) отбор признаков;
- 2) генерация базы нечетких правил;
- 3) оптимизация параметров antecedentов правил.

На этапе отбора признаков решается задача снижения размерности исходного признакового пространства данных. При этом можно избавиться от избыточных признаков и минимизировать переобучение классификатора. Благодаря этому повышается качество классификации и получаемых значений, а также уменьшаются вычислительные затраты [5].

База нечетких правил является основой нечеткого классификатора, представляющая набор ЕСЛИ-ТО правил, которые состоят из antecedentов и consequentов.

На следующем этапе происходит генерация базы нечетких правил. Для этого чаще всего используется кластеризация. В результате формируется начальное, «грубое» приближение нечеткого классификатора.

На третьем этапе выполняется процедура оптимизации параметров antecedentов правил, «тонкой» настройки классификатора. Для оптимизации параметров antecedentов используются алгоритмы оптимизации, осуществляющие поиск в многомерном пространстве, где в роли координат многомерного пространства выступают параметры классификатора. Оптимизация предназначена для уменьшения числа правил, что способствует увеличению интерпретируемости [6].

Существуют различные методы оптимизации. Традиционные методы оптимизации имеют проблему попадания в локальные оптимумы при поиске оптимального решения, поэтому предпочтение отдается метаэвристическим алгоритмам [7], которые обладают большей устойчивостью к этим проблемам. Для оптимизации параметров antecedentов правил будут использоваться метаэвристики, исследованные

студентами ТУСУРа [8–11], включая рассматриваемую метаэвристику Yo-Yo Blind Man Algorithm (Yo-Yo BMA) [12].

Yo-Yo BMA вдохновлена человеческими стратегиями решения задач. Идея алгоритма основана на действиях человека по поиску оптимумов задачи с помощью йо-йо. Поскольку окружение неизвестной задачи принято считать черным ящиком, предполагается, что окружение нашей задачи – это темная комната, занимаемая несколькими людьми, называемыми слепыми. Главная цель этих людей – поиск оптимального значения.

**Эксперимент по оптимизации параметров термов нечеткого классификатора**

Как уже было написано ранее, для оптимизации параметров нечеткого классификатора использовалась метаэвристика Yo-Yo Blind Man Algorithm. Для эксперимента по проверке эффективности рассматриваемой метаэвристики были отобраны 15 наборов данных из репозитория KEEL [13].

Для эксперимента использовались «нарезки» с кроссвалидацией, эксперимент проходил по схеме десятикратной кроссвалидации.

В табл. 1 представлены используемые наборы данных.

Таблица 1

**Наборы данных**

Название	Признаки	Классы	Экземпляры
banana	2	2	5 300
bupa	6	2	345
ecoli	7	8	336
glass	9	7	214
heart	13	2	279
ionosphere	33	2	351
iris	4	3	150
newthyroid	5	3	215
phoneme	5	2	5 404
pima	8	2	768
segment	19	7	2 310
sonar	60	2	208
spambase	57	2	4 597
spectfheart	44	2	267
vehicle	18	4	846
vowel	13	11	990
wdbc	30	2	569
wine	13	3	178

Эксперимент строился на вычислении ошибки классификатора. Сначала получались значения без оптимизации, а затем с использованием метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm.

Число агентов в популяции алгоритма оптимизации было взято 40, а количество итераций = 500.

**Результаты эксперимента**

Ошибка классификации до оптимизации параметров представлена в табл. 2, в табл. 3, 4 – результаты после применения метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm.

TrainBefore и TestBefore – ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках соответственно до начала оптимизации параметров, т.е. после построения структуры алгоритмом экстремальных значений признаков классов. Значение ошибки может отличаться на разных выборках, но в файл или

консоль выводится уже усредненная по всем выборкам ошибка.

TrainAfter и TestAfter – усредненная ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках после применения оптимизации.

Таблица 2

**Ошибка классификации до оптимизации параметров**

Набор данных	TrainBefore	TestBefore
banana	53,19	53,42
bupa	51,34	52,22
ecoli	54,13	54,80
glass	49,94	50,54
heart	32,67	32,96
ionosphere	20,39	20,24
iris	5,56	5,33
newthyroid	4,19	4,59
phoneme	25,27	25,15
pima	32,93	34,52
segment	19,74	19,52
sonar	42,63	42,76
spambase	60,58	60,58
spectfheart	19,56	19,12
vehicle	70,13	70,10
vowel	56,78	56,16
wdbc	7,42	8,09
wine	11,74	12,45

Таблица 3

**Результаты эксперимента TrainAfter**

Набор данных	Средние	Максимальные	Минимальные
	TrainAfter	TrainAfter	TrainAfter
banana	24,748	25,36	24,22
bupa	23,524	23,86	23,19
ecoli	19,224	20,2	18,51
glass	24,968	25,54	24,2
heart	10,972	11,15	10,74
ionosphere	4,856	5,1	4,56
iris	1,586	1,7	1,41
newthyroid	0,716	0,88	0,52
phoneme	19,26	19,71	18,96
pima	21,166	21,63	20,75
segment	7,594	8	7,16
sonar	9,948	10,31	9,72
spambase	8,456	8,84	7,94
spectfheart	11,002	11,49	10,53
vehicle	35,79	36,59	35,12
vowel	33	33,92	32,07
wdbc	2,06	2,25	1,8
wine	0,188	0,25	0,12

По результатам эксперимента можно заключить, что по всем наборам данных после применения метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm ошибка классификации становилась меньше, что доказывает эффективность использования метаэвристики для оптимизации параметров нечеткого классификатора.

**Статистическое сравнение различных метаэвристик**

По результатам эксперимента было проведено сравнение с другими метаэвристиками, которые рассматриваются студентами ТУСУРа.

Crow search algorithm (CSA) – метаэвристический алгоритм, который основан на поведении ворон.

Moth search algorithm (MSA) – метаэвристический алгоритм, который основан на поведении моли. В основу данного алгоритма взято 2 принципа пове-

дения моли: фототаксис (стремление особи двигаться к источнику света) и полет Леви.

Tree-seed algorithm (TSA) – метаэвристический алгоритм, вдохновленный отношениями между деревьями и их семенами. Расположение деревьев и семян соответствует возможным решениям оптимизационной задачи на пространстве поиска.

Black Hole algorithm (BHA) – вдохновленный феноменом черных дыр. В данном алгоритме выбирается наилучший кандидат – черная дыра, которая затем начинает притягивать других кандидатов, называемых звездами.

Таблица 4

Набор данных	Результаты эксперимента TestAfter		
	Средние TestAfter	Максимальные TestAfter	Минимальные TestAfter
banana	25,41	25,83	24,89
bupa	33,62	35,93	31,22
ecoli	27,168	30,61	25,01
glass	33,734	35,77	31,9
heart	17,928	19,26	16,67
ionosphere	10,816	11,94	8,83
iris	6	7,33	4,67
newthyroid	4,086	4,61	3,72
phoneme	20,376	20,8	19,89
pima	25,718	26,69	24,6
segment	8,934	9,74	8,35
sonar	28,602	32,29	23,57
spambase	9,794	10,81	9,11
spectfheart	21,278	22,11	20,61
vehicle	42,26	43,37	40,53
vowel	43,554	45,56	40,2
wdbc	5,874	6,85	5,45
wine	5,64	7,32	3,4

На основании полученных результатов эксперимента был проведен статистический анализ при помощи критерия Фрийдмана. Результаты сравнения представлены в табл. 5.

Таблица 5

Метаэвристики	Результаты эксперимента TrainAfter	
	TrainAfter	TestAfter
Yo-Yo BMA	1,63	2,67
Tree-Seed	2,27	1,87
CrowSearch	2,97	2,57
BlackHole	3,13	3,33
MothSearch	5	5,57

Исходя из статистического анализа, рассматриваемая метаэвристика Yo-Yo BMA является лучшей во время обучения, но уступает Tree-Seed Algorithm и Crow search algorithm при тестовой классификации данных.

### Заключение

В результате эксперимента по оптимизации параметров термов нечеткого классификатора, который проходил по схеме десятикратной кроссвалидации, ошибка классификация была уменьшена, что доказывает целесообразность применения метаэвристик для оптимизации параметров нечетких классификаторов.

Также на основании полученных результатов было проведено статистическое сравнение с другими метаэвристическими, которые рассматриваются студентами ТУСУРа, в результате которого Yo-Yo BMA по-

казала неплохие результаты, получив наименьшую ошибку классификации при обучающих выборках, оказавшись третьей при тестовой выборке. Однако недостатком данного алгоритма является его скорость выполнения. Yo-Yo BMA оказался худшим с точки зрения времени выполнения классификации, значительно отстав от других метаэвристик.

### Литература

- Черезов Д.С. Обзор основных методов классификации и кластеризации данных / Д.С. Черезов, Н.А. Тюкачев // Вестник ВГУ. – Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – Т. 2. – С. 25–29.
- Сергиенко Р.Б. Метод формирования нечеткого классификатора самонастраивающимися коэволюционными алгоритмами // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – Т. 3. – С. 98–106.
- Guoqiang Peter Zhang Neural Networks for Classification: A Survey // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. – 2000. – Vol. 30, № 4. – P.451–462.
- Ishibuchi H. Performance evaluation of fuzzy classifier systems for multidimensional pattern classification problems / H. Ishibuchi, T. Nakashima, T. Murata // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1999. – Vol. 29. – P. 601–618.
- Снижение размерности и отбор наиболее информативных переменных. Снижение размерности признакового пространства. Основные понятия и задачи снижения размерности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bilimdon.ru/snizhenie-razmernosti-i-otbor-naibolee-informativnyh.html>, свободный (дата обращения: 01.03.2021).
- Ходашинский И.А. Построение нечеткого классификатора на основе методов гармонического поиска / И.А. Ходашинский, М.А. Мех // Программирование. – 2017. – № 1. – С. 54–65.
- Abdel-Basset Mohamed Metaheuristic Algorithms: A Comprehensive Review / Mohamed Abdel-Basset, Laila Abdel-Fatah, Arun Kumar Sangaiah / Intelligent Data-Centric Systems. – 2018. – P. 185–231.
- Balasaheb H. Crow search algorithm with discrete wavelet transform to aid Mumford Shah inpainting model / H. Balasaheb, P. Patil, M. Patil // Evolutionary Intelligence. – 2018. – Vol. 11. – P. 73–87.
- Gai-Ge Wang. Moth search algorithm: a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems // Memetic Comp. – 2018. – Vol. 10. – P. 151–164.
- Gungor I. Integration search strategies in tree seed algorithm for high dimensional function optimization / I. Gungor, B.G. Emiroglu, A.C. Cinar et al // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2020. – Vol. 11. – P. 249–267.
- Abdolreza Hatamlou Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering // Information Sciences. – 2013. – Vol. 222. – P. 175–184.
- Soltani-Sarvestani M.A. Human Strategy (HS) Optimization Algorithm / M.A. Soltani-Sarvestani, Zohreh Azimifar, Ali Hamzeh // Soft Comput. – 2018. – Vol. 22. – P. 715–735.
- Knowledge Extraction based on Evolutionary Learning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sci2s.ugr.es/keel/datasets.php>, свободный (дата обращения: 05.05.2021).

**Мёдов Дмитрий Дмитриевич**

Студент каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: dermdv@gmail.com

УДК 004.934.2

Д.И. Новохрестова

## Комбинированная оценка качества произношения слогов

Описан подход к формированию комбинированной оценки качества произношения слогов. Комбинированная оценка формируется как сумма оценок, полученных с использованием ранее исследованных метрик, с учетом весовых коэффициентов. Проанализированы различные комбинации весовых коэффициентов, выбраны их оптимальные значения для дальнейшего применения для оценки слогов с проблемными фонемой [к]. Сравнение оценок, полученных с использованием одной метрики, и комбинированной оценки показало, что комбинированная оценка с приведенными в статье весовыми коэффициентами лучше согласуется с экспертным мнением. Описаны задачи для дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** оценка качества речи, качество произнесения слогов, комбинированная оценка речи.

Повышение качества диагностики онкологических заболеваний привело к увеличению количества вовремя диагностированных случаев рака органов речеобразующего тракта [1]. Основная методика лечения онкологии такой локализации – хирургическое удаление тканей в комбинации с химиотерапией. Подобное вмешательство при раке полости рта и ротоглотки приводит к нарушению таких жизненно важных функций, как речь, голос, дыхание, жевание и глотание. Согласно концепции развития здравоохранения России, рак полости рта и ротоглотки относится к группе наиболее социально значимых болезней, так как нарушение звуочной речи приводит к инвалидизации, снижая трудовой потенциал и качество жизни пациентов [2, 3]. Таким образом, после проведения хирургического лечения обязательным этапом является речевая реабилитация. Увеличение количества пациентов привело к невозможности проведения такой реабилитации «ручным методом» [4], а именно, когда эксперт-логопед несколько раз прослушивает записи и выставляет оценки. Такой метод требует больших затрат временных ресурсов, а также при применении подобного метода трудно отслеживать изменения в произношении фонем конкретного пациента. Этим обосновывается необходимость разработки алгоритмов и программных комплексов, которые позволят в автоматизированном режиме оценивать речь пациента. Такие алгоритмы позволят сократить время, затрачиваемое на выставление оценок, и соответственно сократить время обработки данных в рамках речевой реабилитации.

Ранее был предложен алгоритм для оценки записей произношения слогов, а также произведен анализ предложенных метрик как на основе искусственно сформированного набора данных (запись обычного произношения и произношения с имитацией изменений, характерных для послеоперационного периода), так и на основе записей пациентов, проходящих лечение и речевую реабилитацию на базе НИИ онкологии г. Томска.

Анализ экспертных оценок и оценок, получаемых с использованием предлагаемых метрик, а также выбор метрики, которая дает оценки, наиболее близкие к экспертным, описан в [5]. По итогам описанного в [5] эксперимента сделан вывод, что использование метрики, основанной на DTW-расстоянии, дает

лучший результат. В рамках данной работы описывается попытка сформировать комбинацию оценок, полученных с использованием примененных ранее мер различия. Цель работы – подобрать такую комбинацию весовых коэффициентов, чтобы комбинированная оценка, полученная с использованием этих весовых коэффициентов, имела наименьшее расхождение с экспертными оценками.

### Эксперимент

Для эксперимента взяты звуковые файлы из базы записей пациентов, проходящих реабилитацию в НИИ онкологии г. Томска. Были отобраны записи 15 пациентов, всего 49 сеансов (4 пациента по 4 сеанса, 11 пациентов по 3 сеанса). Первый сеанс у каждого пациента является эталонным, с записями этого сеанса будут сравниваться соответствующие записи из остальных сеансов. Таким образом, для подсчета оценок будет использовано 34 сеанса.

В каждом сеансе в рамках работы были выбраны первые 30 записей. Это записи слогов с проблемной фонемой [к] и ее мягким вариантом [к']. Для каждого расположения фонемы в слоге (в начале, в середине и в конце слога) имеется по 5 записей различных слогов. Общее количество записей для анализа – 1 020 (30 записей в 34 сеансах).

Все выбранные записи были оценены двумя способами.

Первый способ – экспертная оценка. Выставляется экспертом после прослушивания записи: 1, если слог произнесен полностью верно, 0 – иначе. Итоговые оценки записей выбранных сеансов (кроме эталонных) были выставлены следующим образом:

- 1, если у записи в эталонном сеансе оценка 1 и у записи в оцениваемом сеансе оценка 1,
- 0 – иначе.

Второй способ – с использованием разрабатываемого алгоритма для автоматизированной оценки качества речи. На вход алгоритму подается два звуковых файла: эталонная запись и оцениваемая запись. На выходе получается модельная оценка, представляющая собой вещественное число. Для временной нормализации в алгоритме используется DTW-алгоритм (dynamic time warping algorithm – алгоритм динамической трансформации временной шкалы) [6].

Для подсчета использовались три метрики: DTW-расстояние, коэффициент корреляции, расстоя-

ние Минковского (значение параметра равно 3). Описание метрик, а также более полное описание алгоритма оценки приведены в [5].

Для каждой оцениваемой записи были получены 4 оценки: экспертная (бинарная, 0 или 1) и три модельные оценки с использованием метрик (каждая из оценок – вещественное число). Далее была предложена комбинированная оценка, которая для каждой конкретной записи представляет собой сумму модельных оценок с учетом весовых коэффициентов.

Цель эксперимента – подобрать такое сочетание весовых коэффициентов для подсчета комбинированной оценки, чтобы ошибка при сравнении с экспертными оценками была меньше, чем при сравнении с модельными оценками по отдельности.

Обозначим экспертные оценки набором данных  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{1020}\}$ , оценки, полученные с использованием метрики DTW-расстояния,  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_{1020}\}$ , оценки, полученные с использованием коэффициента корреляции,  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{1020}\}$ , и оценки, полученные с использованием метрики расстояние Минковского)  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_{1020}\}$ . Комбинированную оценку обозначим  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{1020}\}$ . В общем виде комбинированная оценка конкретной записи получается следующим образом:

$$C_i = \alpha * X_i + \beta * Z_i + \gamma * W_i, \quad (1)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – весовые коэффициенты.

$$\alpha + \beta + \gamma = 1, \quad (2)$$

$$\alpha \in [0,1], \beta \in [0,1], \gamma \in [0,1]. \quad (3)$$

Для сравнения экспертных и комбинированных оценок последние были преобразованы в бинарный вид при помощи (4):

$$F(C_i) = \begin{cases} 1, & C_i \leq C_t, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $C_t$  – пороговое значение.

Пороговые значения подбирались для набора записей каждого пациента по отдельности. Подбор осуществлялся таким образом, чтобы сумма квадратов разности пар экспертная оценка – преобразованная комбинированная оценка была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n (X_i - F(C_i))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $n$  – количество записей у выбранного пациента.

Для каждой комбинации параметров были подобраны пороговые значения, получены значения ошибок – минимальная сумма разностей квадратов отклонений.

### Результаты

Были получены результаты для следующего набора значений коэффициентов комбинированной оценки:

- $\alpha$  – от 0 до 1 с шагом 0,05;
- $\beta$  – от 0 до  $1 - \alpha$  с шагом 0,05;
- $\gamma$  – вычисляется в зависимости от значений  $\alpha$  и  $\beta$ .

Для каждой комбинации коэффициентов ошибки по всем пациентам были просуммированы. Полученные значения суммарных ошибок представлены в таблице.

Суммарная ошибка для комбинаций весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$

$\beta$	$\alpha$																				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0	270	170	165	163	161	161	160*	160*	161	161	162	162	162	162	162	162	162	162	161	161	161
0,05	323	225	202	190	184	176	174	174	171	171	170	168	167	166	166	166	167	167	167	167	–
0,1	328	250	227	210	200	195	189	187	184	181	177	174	174	173	174	173	172	172	171	–	–
0,15	329	266	242	225	215	205	200	195	193	190	188	185	183	181	179	177	174	174	–	–	–
0,2	332	281	249	237	225	216	210	205	202	196	195	192	190	188	186	184	183	–	–	–	–
0,25	335	294	260	242	236	226	218	213	206	204	202	197	195	194	192	189	–	–	–	–	–
0,3	336	300	268	250	242	234	224	218	216	210	205	204	202	197	196	–	–	–	–	–	–
0,35	336	305	279	258	244	239	233	224	220	216	213	208	205	204	–	–	–	–	–	–	–
0,4	337	310	285	263	249	241	237	232	224	221	215	214	210	–	–	–	–	–	–	–	–
0,45	337	312	294	271	256	245	242	237	232	223	222	216	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	337	315	295	278	261	249	242	241	236	231	223	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,55	338	315	298	280	265	255	246	241	239	235	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,6	339	316	301	284	271	260	248	243	241	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,65	339	317	305	291	277	262	254	246	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,7	339	318	307	294	279	266	259	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,75	339	320	307	295	282	270	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,8	338	321	308	297	284	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,85	338	322	310	299	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,9	338	324	313	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,95	338	324	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	342	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

\* Минимальное значение суммарной ошибки.

Минимальные суммарные ошибки (160) получены для значений коэффициента  $\alpha$ , равных 0,3 и 0,35, и значения  $\beta$ , равного 0. Для определения

точного интервала значений коэффициентов были проведены повторные расчеты для  $\alpha$  от 0,25 до 0,4 и  $\beta$  от 0 до 0,01 с шагом 0,0001. В результате минималь-

ная суммарная ошибка получена при использовании значения коэффициента  $\alpha$  в интервале от 0,27 до 0,37 и значения  $\beta$ , равного 0.

Таким образом, можно сказать, что применение комбинированной оценки позволяет получить результат, более близкий к экспертному мнению, вместо оценки с использованием только одной метрики. Также полученные значения коэффициентов показывают, что для лучшего результата не требуется вычисление всех трех исследуемых метрик, достаточно двух – DTW-расстояния и расстояния Минковского.

#### **Заключение**

В результате анализа полученных значений можно сделать вывод, что использование комбинированной меры позволяет получить оценки качества произношения слогов, более близкие к экспертным оценкам. В рамках данной работы были исследованы записи с проблемной фонемой [к] и ее мягким вариантом, и для них оптимальной является комбинация коэффициентов  $\alpha$  от 0,27 до 0,37, и  $\beta = 0$  ( $\gamma$  вычисляется в зависимости от  $\alpha$  и  $\beta$ ). Таким образом, в комбинированной оценке будут использоваться две метрики из трех исследованных: DTW-расстояние и расстояние Минковского.

Дальнейшими задачами для решения можно выделить следующие направления:

1. Анализ записей, содержащих другие проблемные фонемы ([с], [т] и их мягкие варианты): сравнение оценок, получаемых с использованием метрик, и комбинированной оценки.

2. Подбор комбинаций коэффициентов, которые будут подходить для всех фонем, произношение которых оценивается в рамках речевой реабилитации.

3. Исследование дополнительных возможностей для сужения интервала значений коэффициентов или обоснование выбора конкретного значения из обозначенного выше интервала для дальнейшего использования.

4. Сравнение времени подсчета оценок с использованием метрик и комбинированной оценки на оборудовании НИИ онкологии ввиду требования проведения расчетов в режиме реального времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90082.

#### *Литература*

1. Злокачественные новообразования в России в 2019 г. (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2020. – 2020. – 252 с.
2. Восстановление звукообразования и речи у онкологических больных с дефектами верхней челюсти / А.А. Кулаков, В.М. Чучков, Е.Г. Матякин и др. // Опухоли головы и шеи. – 2012. – № 1. – С. 55–60.
3. Чойнзонов Е.Л. Качество жизни онкологических больных / Е.Л. Чойнзонов, Л.Н. Балацкая, С.В. Дубский. – Томск: Печатная мануфактура, 2011. – 152 с.
4. ГОСТ Р 50840–95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 234 с.
5. Experimental analysis of expert and quantitative estimates of syllable recordings in the process of speech rehabilitation / D. Novokhrestova, E. Kostuchenko, I. Hodashinsky, L. Balatskaya // A. Karpov and R. Potapova (Eds.): SPECOM, 2021, LNAI 12997, 2021. – P. 483–491.
6. Романенко А.А. Выравнивание временных рядов: прогнозирование с использованием DTW // Машинное обучение и анализ данных. – 2001. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jmla.org/papers/doc/2011/no1/Romanenko2011Dynamic.pdf> (дата обращения: 29.09.2021).

---

**Новохрестова Дарья Игоревна**  
Аспирант каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)

М.С. Платонов

## Тестирование метаэвристического алгоритма Black Hole Algorithm в задаче оптимизации параметров термов нечеткого классификатора

Разобраны понятия «нечеткая логика», «нечеткие системы» и «нечеткий классификатор», а также описаны результаты тестирования метаэвристического алгоритма Black Hole Algorithm в качестве оптимизатора термов нечеткого классификатора.

**Ключевые слова:** нечеткий классификатор, метаэвристика, Black Hole Algorithm, оптимизация.

Нечеткая логика – это один из наиболее известных представителей многозначной логики. Основа нечеткой логики была заложена в теории нечетких множеств, изложенной в серии работ Лотфи Заде в 1965–1973 гг. [1]. Его идеи противоречили булевой логике, при помощи которой достаточно трудно, если вообще возможно, описать всё в окружающем мире, поэтому в то время нечеткая логика была причиной острых дискуссий.

В отличие от классической логики Аристотеля, где существует только два состояния – «Истина» или «Ложь» [2], нечеткая логика позволяет переменным иметь любое действительное значение от 0 до 1, т.е. истинное значение может варьироваться между полностью истинным и полностью ложным.

Нечеткие системы – это структуры, основанные на нечетких методах и особенно эффективно применимые там, где объект управления достаточно сложен для его точного описания и существует дефицит априорной информации о поведении системы [3].

Типичная структура нечеткой системы состоит из четырех функциональных блоков: фаззификатора, механизма нечеткого вывода, базы правил и дефаззификатора [4]. В качестве входных данных для нечеткой системы могут использоваться как лингвистические значения (определяемые нечеткими множествами), так и четкие (числовые) данные. Если применяются четкие данные, то процессу вывода предшествует фаззификация, которая устанавливает соответствия между численным значением и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной. Дефаззификация представляет собой обратный процесс перехода от функции принадлежности выходной переменной к ее четкому значению [5].

Целью работы является исследование эффективности метаэвристики Black Hole Algorithm для настройки параметров термов нечеткого классификатора с целью повышения качества классификации, а также сравнения алгоритма с аналогами.

### Нечеткий классификатор

Классификация – фундаментальный метод познания действительности, делящий объект исследования на определенные классы посредством выделения существенных признаков на основе выявления их гомогенности (однородности) и гетерогенности (раз-

нородности). Выявление этих признаков дает возможность глубже изучить исследуемый предмет путем определения состава, свойств, внутренних, внешних связей и путей использования [6].

В последнее время все более популярными становятся нечеткие классификаторы, т.е. классификаторы, в процессе функционирования или обучения которых используются нечеткие множества.

Построение нечеткого классификатора можно разделить на три основных шага: отбор признаков, генерация базы нечетких правил и оптимизация параметров антецедентов (ЕСЛИ-частей) правил.

Задача отбора признаков сводится к снижению размерности исходного пространства данных, что позволяет не только уменьшить размерность задачи, но также и убрать избыточные признаки, что влечет повышение качества классификации. Существуют три процедуры генерации подмножества признаков: полный перебор, эвристики и случайный выбор. Также известны две схемы отбора признаков: «фильтры» и «обертки». Первая работает с участием алгоритма классификации в отборе признаков, вторая, наоборот, без участия [7, 8].

Генерация базы нечетких правил производится при помощи алгоритмов кластеризации, в результате работы которых формируется «грубое» приближение классификатора.

В процедуре оптимизации параметров антецедентов часто используются различные алгоритмы оптимизации, такие как алгоритмы роевого интеллекта или эволюционных вычислений. На этом этапе будет использоваться метаэвристический алгоритм Black Hole Algorithm.

### Black Hole Algorithm

Black Hole Algorithm – это популяционный метод, который имеет некоторые общие черты с другими популяционными методами. Его совокупность возможных решений генерируется и случайным образом распределяется в пространстве поиска. Алгоритмы на основе популяции развивают созданную популяцию в направлении оптимального решения с помощью определенных механизмов. Эволюция популяции в данном алгоритме осуществляется путем перемещения всех кандидатов (звезд) к лучшему кандидату (черной дыре) на каждой итерации и замены тех кандидатов, которые входят в диапазон черной

дыры, вновь созданными кандидатами в пространстве поиска.

Алгоритм черной дыры начинается с начальной совокупности потенциальных решений и целевой функции, которая рассчитывается для них. На каждой итерации алгоритма лучший кандидат становится черной дырой, которая затем начинает притягивать к себе других кандидатов, называемых звездами. Если звезда подойдет слишком близко к черной дыре, она будет поглощена и исчезнет навсегда. В таком случае новая звезда (потенциальное решение) генерируется случайным образом, помещается в область поиска и запускает новый поиск.

**Тестирование и сравнение результатов**

Для тестирования и последующего сравнения были отобраны 15 наборов данных. Тестирование проводилось с использованием 40 агентов на 500 итерациях работы.

Значения работы классификатора до оптимизации представлены в табл. 1, после оптимизации – в табл. 2.

Таблица 1

**Значения работы классификатора до оптимизации**

Наборы данных	Значения до оптимизации	
	Усредненная ошибка классификации на обучающих выборках	Усредненная ошибка классификации на тестовых выборках
banana	53,19	53,42
ecoli	54,13	54,80
glass	49,94	50,54
heart	32,67	32,96
ionosphere	20,39	20,24
newthyroid	4,19	4,59
phoneme	25,27	25,15
pima	32,93	34,52
segment	19,74	19,52
sonar	42,63	42,76
spambase	60,58	60,58
spectfheart	19,56	19,12
vehicle	70,13	70,10
vowel	56,78	56,16
wdbc	7,42	8,09

Таблица 2

**Результаты работы после оптимизации**

Наборы данных	Значения TrainAfter после оптимизации		
	Минимальные	Средние	Максимальные
banana	23,87	25,09	26,13
ecoli	21,59	23,11	25,13
glass	26,16	27,27	28,30
heart	13,83	14,40	14,94
newthyroid	7,28	7,83	8,71
phoneme	0,57	0,70	0,83
pima	19,02	19,24	19,42
segment	21,53	21,69	21,89
sonar	6,46	6,76	6,97
spambase	13,46	14,94	16,03
spectfheart	12,81	13,23	13,71
vehicle	10,78	11,90	12,52
vowel	41,15	43,51	46,56
wdbc	38,00	38,99	40,35

TrainBefore и TestBefore – усредненная ошибка классификации на обучающих и тестовых выборках

до начала оптимизации метаэвристикой. TrainAfter и TestAfter – усредненная ошибка классификации после применения оптимизации.

Основной задачей является уменьшение данных значений после применения оптимизации по сравнению со значениями до оптимизации.

Полученные результаты были сопоставлены с результатами аналогичных метаэвристических алгоритмов, таких как:

1. Tree-seed algorithm (TSA). Основан на деревьях и семенах, в котором их расположение соответствует решениям задач оптимизации в пространстве поиска [10].

2. Crow search algorithm (CSA). Основан на поведении ворон, где птицы защищают свои укрытия от воровства, следуют за другими особями, чтобы своровать, и запоминают расположения своих укрытий [11].

3. Moth search algorithm (MSA). Основан на поведении моли. В основу данного алгоритма взято 2 принципа поведения моли: фототаксис и полет Леви [12].

4. YOYO Blind Man Algorithm (YOYO). Основан на человеческой стратегии, в которой люди находятся в темном пространстве и бросают ЙоЙо [13].

Сопоставление результатов работы алгоритмов представлено в табл. 3.

Таблица 3

**Ранги**

	Средние ранги		Критерий Фридмана		Время
	TrainAfter	TestAfter	TrainAfter	TestAfter	
YoYo	1,60	2,67	1,63	2,67	5
Tree	2,27	1,87	2,27	1,87	4
Crow	2,93	2,53	2,97	2,57	1
BH	3,13	3,30	3,13	3,33	2
Moth	5,00	4,57	5	4,57	3

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что алгоритм работает несколько хуже своих аналогов, однако по времени работы находится на почти лидирующих позициях. Это можно объяснить недостаточной работой алгоритма в проверке близких к наилучшей точке областей.

**Заключение**

Было проведено исследование работы метаэвристического алгоритма Black Hole Algorithm в качестве оптимизатора термов нечеткого классификатора. Для этого был написан код, на основе которого производились тестирования на основе 3 проверочных и 15 сравнительных наборов данных.

Black Hole Algorithm в целом показал себя неплохо в оптимизации параметров, однако все же отстает от других алгоритмов, что говорит о необходимости изменения алгоритма с целью улучшения получаемых результатов.

*Литература*

1. Lotfi Z. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – P. 338–538.  
 2. Aristotle’s Logic (Stanford Encyclopedia of Philosophy) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plato.stanford.edu/entries/aristotle-logic/> (дата обращения: 31.03.2021).



3. Нечеткие системы управления динамическими объектами на основе микроконтроллеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.spbstu.ru/dl/531/chapter6.html> (дата обращения: 31.03.2021).

4. Czabanski R. Introduction to Fuzzy Systems / R. Czabanski, M. Jezewski, J. Leski // Theory and Applications of Ordered Fuzzy Numbers. Studies in Fuzziness and Soft Computing. – 2017. – Vol. 356.

5. Системы нечеткого вывода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nrsu.bstu.ru/chap27.html> (дата обращения: 31.03.2021).

6. Классификация как метод исследования. Исследование систем управления: конспект лекций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marketing.wikireading.ru/41682> (дата обращения: 31.03.2021).

7. Dash M. Feature Selection for Classification / M. Dash, H. Liu // Intelligent Data Analysis. – 1997. – Vol. 1. – P. 131–156.

8. Ходашинский И.А. Построение нечеткого классификатора на основе методов гармонического поиска / И.А. Ходашинский, М.А. Мех // Программирование. – 2017. – № 1. – С. 54–65.

9. Hatamlou A. Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering // Information Sciences. – 2013. – Vol. 222. – P. 175–184.

10. Gungor I. Integration search strategies in tree seed algorithm for high dimensional function optimization / I. Gungor, B. Gursel, A. Cevahir // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2020. – Vol. 11. – P. 249–267.

11. Balasaheb H. Crow search algorithm with discrete wavelet transform to aid Mumford Shah inpainting model / H. Balasaheb, M. Patil // Evolutionary Intelligence. – 2018. – Vol. 11. – P.73–87.

12. Wang G. Moth search algorithm: a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems // Metaheuristic Computing. – 2018. – Vol. 10. – P. 151–164.

13. Soltani-Sarvestani M.A. Human Strategy (HS) Optimization Algorithm / M.A. Soltani-Sarvestani, Z. Azimifar, A. Hamzeh // Soft Computing. – 2018. – Vol. 22. – P. 715–735.

---

**Платонов Марк Сергеевич**

Студент каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: [monstromark@gmail.com](mailto:monstromark@gmail.com)

П.А. Пухова, К.С. Сарин

## Модифицированный тест Фридмана для статистического сравнения качества классификации алгоритмов машинного обучения

Проведены разработка и исследование модифицированного статистического теста Фридмана для сравнения алгоритмов классификации, учитывающего результаты запусков алгоритмов.

**Ключевые слова:** статистический тест, классификатор, машинное обучение, тест Фридмана, ранжирование.

Тест Фридмана как один из видов непараметрических тестов является широко используемым для улучшения процесса оценки эффективности различных алгоритмов обучения [1–7]. Этот тест рекомендуется использовать для выявления значительных различий в экспериментальных результатах, полученных алгоритмом на разных наборах данных [2].

С целью оценки новых алгоритмов обучения во многих случаях применяется  $k$ -кратная перекрестная проверка [8], которая будет генерировать множество значений точности. Эти значения могут указывать на эффективность предлагаемого обучающего алгоритма. Однако традиционный метод ранжирования в тесте Фридмана использует только среднее значение точности без учета дополнительной информации, которая может быть извлечена из них [9].

Целью настоящей работы является разработка и исследование модифицированного статистического теста Фридмана для сравнения алгоритмов классификации.

### Модификация теста Фридмана

Для разработки модифицированного теста Фридмана было найдено четыре метода ранжирования, которые могут быть использованы для реализации.

Наивный метод ранжирования, или классический ранговый метод (NRA), вычисляет средние значения точности, полученные разными алгоритмами для каждого набора данных. Затем ранги определяются по средним значениям точности. Большее среднее значение точности будет соответствовать меньшему рангу.

Взвешенный ранговый метод (WRA) по сравнению с NRA учитывает величину различия между средними значениями точности.

Глобальный ранговый метод (GRA) вместо того, чтобы рассматривать общие значения точности, учитывает значения точности, полученные алгоритмами обучения при каждом запуске [9]. При этом ранги не отражают величину различия между точностями.

Взвешенный глобальный ранговый метод (WGRA) сочетает в себе преимущества WRA и GRA. Он не только отражает различия между значениями точности, но также учитывает каждый запуск алгоритма [9].

В частности, WGRA сначала присваивает ранги  $R_{ijh}$  конкретному алгоритму обучения  $i$  для каждого набора данных  $j$  при запуске  $h$  на основе соответствующих значений точности. Таким образом, получается

множество матриц  $R'_h$ , хранящих информацию о работе алгоритмов на  $h$ -м запуске.

$$\Pi_{wg}^1(V) = (R'_1 \ R'_2 \ \dots \ R'_H)^T = \{R'_h\}_{(I \times J)},$$

$$R'_h = \begin{pmatrix} R_{11h} & R_{21h} & \dots & R_{I1h} \\ R_{12h} & R_{22h} & \dots & R_{I2h} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1Jh} & R_{2Jh} & \dots & R_{IJh} \end{pmatrix}_{(I \times J)}, \quad (1)$$

где  $\Pi_{wg}$  обозначает метод ранжирования WGRA; а  $\Pi_{wg}^1$  – это первый оператор в WGRA;  $I$  – количество алгоритмов;  $J$  – количество набор данных;  $R_{ijh}$  рассчитывается следующим образом:

$$R_{ijh} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I i - \frac{(\bar{v}_{ijh} - \bar{v}_{.jh}) \sigma_r(jh)}{\sigma(jh)}, \quad \bar{v}_{.jh} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I v_{ijh},$$

$$\sigma(jh) = \left( \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (v_{ijh} - \bar{v}_{.jh})^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\sigma_r(jh) = \rho_1(jh) * \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I i, \quad (2)$$

где  $v_{jh}$  и  $\sigma(jh)$  обозначают средние значения точности и соответствующие среднеквадратические отклонения всех алгоритмов обучения для каждого набора данных  $j$  в каждом запуске соответственно;  $\rho_2(jh) \in (0, 1]$  – заранее заданный параметр, который в работе принимает значение 0,61 [9]. Далее вычисляется средний ранг для каждого алгоритма в каждом наборе данных следующим образом:

$$\Pi_{wg}^2(\Pi_{wg}^1(V)) = \begin{pmatrix} \bar{R}_{11} & \bar{R}_{21} & \dots & \bar{R}_{I1} \\ \bar{R}_{12} & \bar{R}_{22} & \dots & \bar{R}_{I2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{R}_{1J} & \bar{R}_{2J} & \dots & \bar{R}_{IJ} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\bar{R}_{ij} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H R_{ijh}, \quad (4)$$

где  $\Pi_{wg}^2$  – второй оператор в WGRA;  $H$  – количество запусков. Далее присваиваются ранги  $R_{ij}$  разным алгоритмам обучения на основе соответствующих средних рангов  $\bar{R}_{ij}$  следующим образом:

$$\Pi_{wg}^2(\Pi_{wg}^2(\Pi_{wg}^1(V))) = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{21} & \dots & R_{J1} \\ R_{12} & R_{22} & \dots & R_{J2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1J} & R_{2J} & \dots & R_{JJ} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Наконец, WGRA получает средние оценки для каждого алгоритма на всех наборах данных, что выглядит следующим образом:

$$\Pi_{wg}^4(\Pi_{wg}^3(\Pi_{wg}^2(\Pi_{wg}^1(V)))) = (\bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_J), \quad (6)$$

где  $\Pi_{wg}^2$  – четвертый оператор в WGRA. В итоге WGRA состоит из набора операций преобразования данных, которые заключаются в следующем:

$$\Pi_{wg}(V) = \Pi_{wg}^4\left(\Pi_{wg}^3\left(\Pi_{wg}^2\left(\Pi_{wg}^1(V)\right)\right)\right). \quad (7)$$

Основное различие между WGRA и GRA связано с первым оператором соответствующих методов. Оператор GRA преобразует исходные значения точности в ранги в соответствии с их порядками, в свою очередь, оператор WGRA вычисляет ранги в соответствии со значениями точности в каждом запуске.

Для модификации теста Фридмана было выбрано взвешенное глобальное ранжирование (WGRA). Данный метод учитывает результаты запусков алгоритмов, а также величину различия в оценках эффективности.

Расчет методом взвешенного глобального ранжирования был произведен на двадцати двух наборах данных.

Так как для модификации теста Фридмана был выбран взвешенный глобальный ранговый метод (WGRA), а данный метод учитывает запуски алгоритмов, используемые наборы данных нужно было разбить на 10 блоков, для разбиения была использована 10-кратная перекрестная проверка [8].

Для исследования было взято 3 метода классификации: метод  $k$ -ближайших соседей, дерева решений и наивный Байесовский классификатор [8].

В итоге были зафиксированы десять значений точности для каждого из 22 наборов данных.

Далее было проведено взвешенное глобальное ранжирование, результаты ранжирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Точность классификаций и ранжирование на наборе данных Iris

Ran	Точность классификаций			WGRA		
	KNN	DR	NB	KNN	DR	NB
1	1	1	0,998	1,2956	1,2956	3,4087
2	1	0,98	1	1,2956	3,4087	1,2956
3	1	0,987	1	1,2956	3,4087	1,2956
4	1	0,933	0,933	0,5912	2,7043	2,7043
5	0,87	0,933	0,933	3,4087	1,2956	1,2956
6	0,93	0,867	0,867	0,5912	2,7043	2,7043
7	0,99	1	1	3,4087	1,2956	1,2956
8	0,87	0,867	0,867	0,5912	2,7043	2,7043
9	0,93	0,6	0,867	1,0877	3,3857	1,5264
10	1	1	0,996	1,2956	1,2956	3,4087
Avg	0,959	0,9167	0,9461	1,4861	2,3498	2,1639

На следующем шаге были собраны все средние значения рангов каждого классификатора, учитывая запуски, и произведен расчёт статистики Фридмана, результаты представлены в табл. 2.

По результатам расчётов значение статистики Фридмана получилось равным 8,237. Полученный результат сравнивался с таблицей верхних критических значений для теста Фридмана.

Исходя из данных таблицы верхних критических значений для теста Фридмана, был сделан вывод, что расчетное значение  $F = 8,237$  превышает критическое значение  $F = 6,091$  для уровня значимости 0,05. Следовательно, нулевая гипотеза будет отклонена, это значит, что есть некоторые различия между эффективностью работы классификаторов, в то время как применение наивного метода ранжирования не показало различий в работе алгоритмов.

### Заключение

Был произведен сравнительный анализ результатов работы классического теста Фридмана и модифицированного теста Фридмана. Классический тест, который не учитывает различия результатов, полученных алгоритмами обучения на каждом наборе данных, и не учитывает выполнение алгоритмов обучения при каждом запуске, показал, что используемые классификаторы работают одинаково.

В свою очередь, модифицированный тест Фридмана, который учитывает результаты запусков алгоритмов, а также величину различия в оценках эффективности, отвергнул нулевую гипотезу и показал, что есть некоторые различия между эффективностью работы классификаторов. Из проведенного сравнения можно сделать вывод, что использование взвешенного глобального ранжирования наиболее эффективно для оценки качества классификации алгоритмов машинного обучения.

Таблица 2

Средние значения рангов

Datasets	KNN	DR	NB
Iris	1,4861	2,3498	2,1639
Wdbc	2,3880	1,9735	1,6384
Wine	3,065	2,0482	1,1700
Phoneme	0,6438	2,3607	2,9953
Spambase	2,5833	1,2909	2,1256
Vehicle	1,5996	1,0762	3,3240
Vowel	1,1997	3,3206	1,4796
Segment	1,4688	2,4920	2,0391
Australian	2,8522	1,5783	1,5694
Haberman	2,1665	1,9822	1,8512
Ionosphere	2,2074	2,0580	1,7345
Sonar	2,6631	2,0963	1,2453
Letter	0,9830	3,0963	1,9205
Tae	1,9729	1,9897	2,0372
Texture	1,1003	3,1210	1,7785
Glass	1,2474	1,5246	3,2278
Car	0,9116	1,9429	3,1454
Ecoli	2,7101	1,7174	1,5724
Wisconsin	1,9511	1,9320	2,1168
Airlines	2,5063	1,3528	2,1030
Zoo	1,6041	2,7678	1,6280
Abalone	2,7921	1,1690	2,0388
Avg	1,9138	2,0562	2,0411

*Литература*

1. Schervish M.J. Theory of Statistics. – NY, USA: Springer, 2016. – 435 p.
2. Demsar J. Statistical Comparisons of Classifiers over Multiple Data Sets // Journal of Machine Learning Research. – 2006. – № 7. – P. 1–30.
3. Inferring statistically significant hidden Markov models / L. Yu, J.M. Schwiier, R.M. Craven, R.R. Brooks, C. Griffin // IEEE Trans. Knowl. Data Eng. – 2013. – Vol. 25, № 7. – P. 1548–1558.
4. Большакова Л.В. Применение статистических гипотез в научно-практических исследованиях / Л.В. Большакова, Н.А. Яковлева // Наука, техника и образование. – 2017. – Т. 1, № 5. – С. 6–11.
5. On the statistical analysis of the parameters trend in a machine learning algorithm / S. García, J. Derrac, S. Ramírez-Gallego, F. Herrera // Progr. Artif. Intell. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P. 51–53.
6. Analyzing convergence performance of evolutionary algorithms: A statistical approach / J. Derrac, S. García, S. Hui, P.N. Suganthan, F. Herrera // Inf. Sci. – 2014. – Vol. 289. – P. 41–58.
7. Bandyopadhyay S., Mallik S., Mukhopadhyay A. A survey and comparative study of statistical tests for identifying differential expression from microarray data / S. Bandyopadhyay, S. Mallik, A. Mukhopadhyay // IEEE ACM Trans. Comput. Biol. Bioinf. – 2016. – Vol. 11, No. 1. – P. 95–115.
8. Мюллер А. Введение в машинное обучение с помощью Python: рук-во для специалистов по работе с данными: пер. с англ. – СПб.: Альфа-книга, 2017. – 480 с.
9. A New Kind of Nonparametric Test for Statistical Comparison of Multiple Classifiers Over Multiple Datasets / Z. Yu, Z. Wang, J. You, J. Zhang, J. Liu, H. Wong, G. Han // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2016. – No. 99. – P. 1–14.

**Пухова Полина Андреевна**

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: polina.pukhova@yandex.ru

**Сарин Константин Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа

Эл. почта: sks@security.tomsk.ru

С.А. Ильина, М.Е. Семёнов

## Разработка конфигуратора прогноза планово-предупредительных ремонтов с применением нейро-нечётких систем

Описано создание конфигуратора прогноза планово-предупредительных ремонтов на основе применения нейро-нечётких систем (ННС), а точнее адаптивной сетевой системы нечёткого вывода. Разработанный конфигуратор используется для прогнозирования коэффициента неравномерности использования производственного оборудования на основе данных, полученных из системы SCADA, по результатам «ручных» измерений и в результате работы имитационной модели. В программной реализации конфигуратора имеется возможность пользовательской настройки некоторых параметров.

**Ключевые слова:** адаптивная сетевая система нечёткого вывода, нечёткие нейронные сети, прогнозирование на основе анализа данных.

В условиях производства на оборудование влияют множество внешних факторов, оборудование не всегда используется равномерно, что приводит к постепенному ухудшению технического состояния и может привести к неисправности или даже поломке. Для диагностики и прогнозирования потенциальной неисправности оборудования применяются различные методы и модели проактивной поддержки принятия решений [1].

В литературе [1, 2] предложено множество подходов для диагностики технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования. Все эти решения можно разделить на три больших класса подходов, основанных на физических моделях (physical-based methods, PhM), использовании формализованных знаний (knowledge-based methods, KBM), анализе данных (data-driven methods, DDM).

Целью работы является разработка конфигуратора интеллектуальной системы для формирования расписания планово-предупредительных ремонтных работ. Мы использовали подход, основанный на анализе данных, программная реализация предложенного метода включает в себя адаптивную нейро-нечёткую систему вывода (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS). ANFIS сочетает в себе подходы нечёткой логики и нейронных сетей, создавая гибридную интеллектуальную модель с преимуществами обоих методов.

Использование ANFIS потребовало реализовать как алгоритмы нейронных сетей, так и алгоритмы нечёткого логического вывода, которые базируются на понятии нечёткого множества [3]:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in U \}, \quad (1)$$

где  $x$  – входная переменная,  $\mu_A(x) : U \rightarrow [0, 1]$  – функция принадлежности нечёткого множества  $A$ , показывающая степень принадлежности каждого элемента  $x$  множеству  $A$ .

Предложенная ANFIS использована в качестве конфигуратора прогноза планово-предупредительных ремонтов. Данный конфигуратор обучается на наборе данных, полученных из системы диспетчерского управления и сбора данных (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), а также измерений,

собранных в «ручном» режиме. Результатом работы имитационной модели является коэффициент неравномерности  $k_{\text{нер}}$ , который показывает отклонение номинального уровня загрузки оборудования от реального, далее  $k_{\text{нер}}$  используется для вычисления остаточного ресурса оборудования:

$$R_{\text{ост}} = \left( 1 - k_{\text{нер}} \frac{T}{N} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $R_{\text{ост}}$  – остаточный ресурс,  $N$  – реальное время работы оборудования,  $T$  – нормативное время работы оборудования.

### Структура адаптивной нейро-нечёткой системы вывода

Система вывода ANFIS имеет структуру многослойной нейронной сети из пяти основных слоёв, каждый из которых выполняет свою функцию (рис. 1).

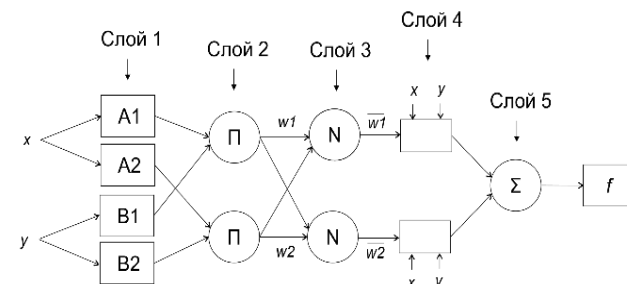


Рис. 1. Структура сети ANFIS

Слой 1 получает входные параметры  $x, y$  и вводит их в модель ANFIS. Этот слой считается входом нечёткой системы. Выход слоя 1 становится входом слоя 2, несущего предыдущие значения функций принадлежности  $\Pi$ , которые распределяются на основе входных значений. Узлы слоя 2 определяют нечёткие правила и передают их на слой 3 сети с соответствующей степенью активности  $w_1, w_2$ . Затем слой 3 нормализует степени активности правил,  $\bar{w}_1, \bar{w}_2$ . Слой 4 (слой консеквентов) принимает узлы и функции и представляет первую модель на основе производных параметров, отправляя их на выходной слой 5 (сумматор  $\Sigma$ ) [4]. Стоит отметить, что слой 4 в данной работе представлен несколькими линейными слоями многослойной нейронной сети, количество этих слоёв может задать пользователь.

Система ANFIS имеет структуру многослойного перцептрона, и для его обучения можно использовать различные алгоритмы. В работе реализовано два варианта обучения: гибридное и негибридное. Негибридное обучение подразумевает использование алгоритма обратного распространения ошибки, где различают два прохода, выполняемых в процессе вычислений: а) прямой (forward pass), б) обратный (back pass). При прямом проходе синаптические веса остаются неизменными во всей сети, но последовательно вычисляются функциональные сигналы. При использовании гибридного метода обучения мы использовали алгоритм обратного распространения в комбинации с вычислением среднеквадратичной ошибки для настройки параметров.

Программная реализация ANFIS осуществлена на языке программирования Python, структура сети сформирована с использованием стандартной библиотеки PyTorch и результатов исследования [5]. Каждый слой описан как отдельный класс со своими функциями инициализации и прямого прохода. Так, слой 1 реализован с помощью класса FuzzifyLayer, слой 2, формирующий правила, – с помощью класса AntecedentLayer, слой 3, выполняющий нормализацию, реализован функцией Python – normalize, слой 5 (сумматор) – при помощи класса WeightedSumLayer. Для реализации негибридного обучения описано два варианта слоя 4 (слоя консеквентов) и соответственно два класса: ConsequentLayer – для гибридного обучения и PlainConsequentLayer – для негибридного. Также реализован класс для описания нечёткой переменной – FuzzifyVariable, который аналогично содержит функции инициализации и вычисления. Кроме того, описан класс самой сети ANFIS – это класс AnfisNet, в котором последовательно инициализируются все пять слоёв, причём слой 4 представляет собой последовательность из не менее чем трёх линейных слоёв нейронной сети.

**Формирование правил**

Нечёткий логический вывод, который осуществляется сетью ANFIS, подразумевает под собой процесс, в результате которого из нечётких предпосылок получают некоторые следствия. В общем случае прямой нечёткий логический вывод, применяющийся в данной реализации адаптивной нейро-нечёткой системы, имеет следующие этапы [3]:

1. Задание нечёткой импликации вида

$$\text{ЕСЛИ } x \text{ есть } A, \text{ ТО } y \text{ есть } B,$$

где  $x \in X$  – входная переменная;  $X$  – область определения предпосылки нечёткого продукционного правила;  $y \in Y$  – выходная переменная;  $Y$  – область определения подзаклЮчения нечёткого продукционного правила;  $A, B$  – нечёткие множества, определённые на  $X, Y$  с функциями принадлежности  $\mu_A(x) \rightarrow [0, 1], \mu_B(x) \rightarrow [0, 1]$  соответственно.

2. Задание нечётких подусловий вида

$$x' \text{ есть } A',$$

где  $x'$  – фактическое значение переменной  $x$ ,  $A'$  – нечёткое множество, отражающее значение  $x'$ .

3. Задание нечётких подзаклЮчений вида:

$$y' \text{ есть } B',$$

где  $y'$  – фактическое значение переменной  $y$ ,  $B'$  – нечёткое множество, отражающее значение  $y'$ .

Для нечёткого логического вывода предложены различные алгоритмы [6]. В представленной реализации использована система нечёткого вывода Такаги–Сугено–Канга. Общая форма модели может быть представлена в векторном виде:

$$\text{если } x \text{ это } A, \text{ то } y = f(x), \quad (3)$$

где  $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  – вещественная функция.

В качестве функции заключения обычно используют линейный полином:

$$y_i = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij}x_j, \quad (4)$$

где  $p_{ij}$  – коэффициенты, настраиваемые в процессе обучения сети, условия вида (3) представляются функциями принадлежности [7, 8]. В программной реализации следствия Такаги–Сугено–Канга используются на этапе слоя консеквентов (слой 4).

**Функции принадлежности**

В ANFIS заложены функции принадлежности разного вида: трапециевидная, сигмоидальная, гауссова [9]:

$$f_T(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b; \\ 1, & b \leq x < c; \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d; \\ 0, & d \leq x, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a, b, c, d$  – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением  $a \leq b \leq c \leq d$ . Примером функций принадлежности S-образного и Z-образного (в зависимости от положительного или отрицательного значения параметра  $a$  соответственно) видов может служить сигмоидальная функция, задающаяся следующим аналитическим выражением:

$$f_S(x, a, b) = \frac{1}{1 + \exp\{-a(x-b)\}}, \quad (6)$$

где  $a, b$  – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные соотношением  $a < b$ . В качестве функций П-образного вида часто применяется функция Гаусса:

$$f_G(x, \mu, \sigma) = \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – математическое ожидание, а  $\sigma^2$  – дисперсия распределения.

Для функций (5)–(7) в программной реализации созданы функции и классы SigmoidMemFunc, GaussMemFunc и TrapezoidalMemFunc, позволяющие выбирать тип функции принадлежности при обучении сети и автоматически оценивать параметры этих функций. Каждый из классов содержит функции инициализации и вычисления соответствующей функции принадлежности. Также реализованы функции для создания набора функций принадлежности

того или иного типа, исходя из набора их параметров: `make_trap_mfs()` и `make_sigmoid_mfs()`, `make_gauss_mfs()` для задания трапецевидной и сигмоидальной и функции Гаусса соответственно. На вход эти функции принимают значения необходимых параметров. Так, для трапецевидной функции это четыре параметра:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  из формулы (5), ширина верхнего основания трапеции и список центров верхнего основания, для функции Гаусса это параметр  $\sigma$  и список параметров  $\mu$  из формулы (7), а для сигмоидальной функции это параметр  $a$  и список параметров  $b$  из формулы (6). Каждая из данных функций возвращает значения заданного количества соответствующих функций принадлежности в каждой точке из массива входных данных. Вышеперечисленные функции вызываются в функции `make_anfis`, которая принимает на вход массив данных для обучения, количество и тип функций принадлежности, количество выходных данных, параметр, отмечающий, гибридное ли будет обучение, и возвращает структуру ANFIS модели. В этой же функции генерируются входные параметры функций принадлежности в зависимости от вида исходных данных.

Кроме того, описаны функции, реализующие обучение и тестирование модели ANFIS: `train_anfis_with` и `test_anfis` соответственно. На вход эти функции получают модель ANFIS, данные выборки. Функция, реализующая обучение, также получает в качестве входных данных количество эпох обучения, параметры, определяющие количество линейных слоёв (не менее трёх), и число нейронов на них, оптимизатор, критерии обучения. Также реализовано две функции обучения: `train_hybrid()` и `train_non_hybrid()` для случая с гибридным и негибридным методом обучения соответственно, на выходе этих функций получаем обученную соответствующим образом модель. Для проверки на корректность обучения вычисляется, сколько спрогнозированных значений совпало с действительными, реализована ли эта процедура в функции `num_cat_correct()`. Чтобы использовать уже обученную модель, достаточно считать входные данные и передать их в эту модель, этот процесс описан в функции `prediction()`.

### Результаты

Разработан конфигуратор прогноза планово-предупредительных ремонтов на основе адаптивной нейро-нечёткой системы вывода. Созданный конфигуратор имеет возможность пользовательской настройки параметров: выбор гибридного или негибридного метода обучения, вид и количество функций принадлежности (Гаусса, сигмоидальная, трапецевидная), количество линейных слоёв и нейронов на них, а также количество эпох обучения. На тестовом наборе данных при использовании двух функций Гаусса в качестве функций принадлежности и стохастического градиентного спуска со скоростью обучения 0,001 и импульсом 0,99, за 200 эпох обучения достигается 30% ошибка (рис. 2).

Реализованная модель предназначена для прогнозирования коэффициента неравномерности использования производственного оборудования, на основе данных, полученных из системы SCADA, по результатам «ручных» измерений и в результате ра-

боты имитационной модели. Исходя из значения спрогнозированного коэффициента, можно вычислить остаточный ресурс оборудования, который используется для планирования ремонтных работ и закупок запасных элементов.

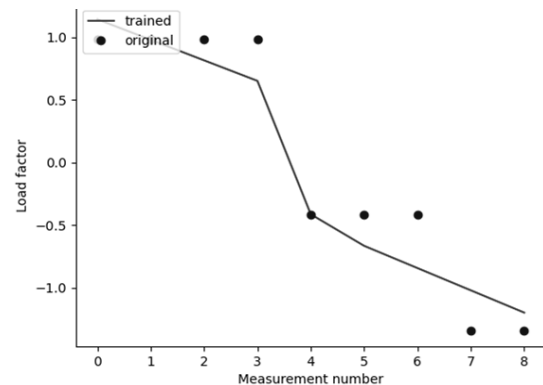


Рис. 2. График сопоставления прогноза с реальными значениями

Авторы выражают благодарность к.т.н. А.Л. Рудкову (АО УК «ЭФКО») за участие в постановке задачи и обсуждение результатов работы.

### Литература

1. Lei Y. Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery. – Butterworth-Heinemann, 2017. – 366 p.
2. Сай Ван Квонг. Модели и методы проактивной поддержки принятия решений при управлении техническим состоянием оборудования: дис. ... канд. техн. наук / Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2020. – 152 с.
3. Нижневский В.В. Реализация алгоритмов нечёткого логического вывода на языке программирования Python / В.В. Нижневский, М.Г. Матвеев // Сб. студ. науч. работ ф-та компьютерных наук ВГУ. – 2019. – С. 152–157.
4. Najafi B. Application of ANFIS, ANN, and logistic methods in estimating biogas production from spent mushroom compost (SMC) / B. Najafi, S.F. Ardabili // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 133. – P. 169–178.
5. ANFIS in pyTorch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/jfpower/anfis-pytorch/>, свободный (дата обращения: 23.07.2021).
6. Angelov P. Simplified fuzzy rule-based systems using non-parametric antecedents and relative data density / P. Angelov, R. Yager // 2011 IEEE Workshop on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS). – 2011. – P. 62–69.
7. Солдатова О.П. Алгоритм минимизации базы правил нечеткой нейронной сети Такаги–Сугено–Канга / О.П. Солдатова, Ю.М. Шепелев // European research: сб. статей победителей X Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: Наука и просвещение, 2017. – С. 46–49.
8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.

### Ильина Софья Андреевна

Студентка ОЭФ, ИЯТШ НИ ТПУ

Эл. почта: sai8@tpu.ru

### Семёнов Михаил Евгеньевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент ОЭФ, ИЯТШ НИ ТПУ

Эл. почта: sme@tpu.ru

**В.С. Шайдорова**

## Прогнозирование посещаемости разных категорий сайтов

Прогноз посещаемости сайта – это одна из самых важных целей анализа. SEO-прогноз посещаемости сайта служит для того, чтобы понять то, насколько бизнес-картина или модель организуемого бизнеса достижима, если осуществляется использование средств интернет-маркетинга. На этой стадии обычно определяется то, сколько потенциальных клиентов будущего предприятия используют интернет для поиска и нахождения услуги. В ходе данной работы было рассмотрено несколько методов прогнозирования: классические методы прогнозирования и рекуррентные нейронные сети LSTM. На основе результатов экспериментов с классическими методами прогнозирования и рекуррентными нейронными сетями для каждого ряда данных был выбран метод, имеющий минимальную среднюю абсолютную ошибку в процентах. Минимальное значение при одномерном прогнозировании показал метод LSTM с накоплением, минимальное значение ошибки – многомерные модели LSTM.

**Ключевые слова:** прогнозирование, сайт, LSTM, классические методы прогнозирования.

Показатели посещаемости сайта – это не только данные, по которым можно понять активность каждого интернет-ресурса. Это также очень полезная информация для анализа как для самой компании, так и для других, например прямых конкурентов.

Существует множество работ, посвященных прогнозированию временных рядов, чем и являются выбранные для этой работы данные.

В работе [1] авторы сравнивают модели регрессии и нейронные сети для прогнозирования валютных котировок. В работе авторы сравнивают модели, используя среднюю процентную ошибку (MAE). Для модели ARIMA ошибка составила 17%. Для искусственных НС – 14%.

В статье [2] авторы также использовали набор данных посещения сайта «Википедия». Авторы исследовали два алгоритма ARIMA и рекуррентную нейронную сеть (RNN) с использованием долгой краткосрочной памяти. При сравнении лучшим методом оказались RNN.

В работе [3] автор сравнивает 18 моделей для предсказания будущих значений временного ряда. Среди моделей: ARIMA, LSTM, CNN, SARIMA, Holt-Winter и др. Все модели имели высокую точность, однако лучшими моделями оказались, модели НС. Например, для LSTM MAPE равнялось 0,38.

В работе [4] автор сравнивает три подхода – это машина опорных векторов, модель ARIMA, также искусственные нейронные сети. Автор прогнозирует цены на товары по разным категориям. SVM превзошел два других метода почти во всех категориях продуктов (минимальный MAPE = 0,045).

Автор сравнивает пять моделей в своей работе [5]. Также автор использует две метрики точности MAE и среднеквадратическую ошибку (RMSE). Для меры точности MAE лучшей моделью оказалась модель авторегрессии и распределенного лага (ARDL), ошибка равнялась = 2,018. При мере точности RMSE лучшей моделью была ARIMA (RMSE = 2,672).

В работе [6] авторы сравнивают три подхода к прогнозированию временных рядов (ARIMA, искусственные нейронные сети и модель Винсента). Лучшей моделью для прогнозирования пассажиропотока, который является сезонным, оказалась ARIMA (ошибка равнялась 1,6%).

В работе [7] авторы делают долгосрочные прогнозы стоимости недвижимости, используя искусственные нейронные сети. Средняя квадратичная ошибка нейронной модели составляет 0,11.

В работе [8] автор сравнивает три подхода: ARIMA, LSTM и Prophet, предложенный Facebook. Автор использует RMSE для оценки точности. Лучшей моделью оказалась модель ARIMA (RMSE = 8,11).

В работе [9] авторы рассматривают проблему прогнозирования ресурсов солнечной и ветровой энергии. Временной ряд имеет сезонность в зависимости от времени года. Авторы сравнивают два подхода – SVM и искусственные нейронные сети, в качестве меры точности выступает RMSE. SVM продемонстрировали лучший результат (RMSE = 0,69).

В работе [10] авторы использовали набор данных, состоящий из 145 тыс. временных рядов, в которых представлено ежедневное посещение «Википедии», всего в каждом ряду имеется 804 ежедневных измерения посещаемости. Авторами было предложено три подхода для прогнозирования посещаемости интернет-ресурса – ARIMA, LSTM [11]. Третий подход – Wavenets [12]. Авторы использовали модифицированную версию SMAPE в качестве меры точности. Авторы предсказывали последние 64 дня последовательности, в итоге ими была достигнута точность, равная 35,89.

В [13] представлен и обоснован подход к прогнозированию, заключающийся в использовании рекуррентных нейронных сетей. В качестве меры точности было использовано среднеквадратическое отклонение (NRMSE). Авторы предсказывали посещение на 7 дней вперед. Результаты показали, что сети LSTM превышают по точности другие методы машинного обучения (значение NRMSE от 0,25 до 0,85).

### Анализ корпуса текстов

Для данной работы было взято 6 категорий сайтов, в каждой категории присутствует от 2 до 3 сайтов.

Первая категория – сайты туристических операторов (TUI, Anex Tour и Tez Tour) и вторая – для покупки авиабилетов (Aviasales и S7).

Третьей категорией сайтов являются интернет-магазины. Список магазинов: AliExpress, OZON и Яндекс Маркет.



Четвертая категория сайтов – это новостные издания. Были взяты самые популярные в России СМИ – РБК, Яндекс Новости, РИА.

Пятая категория сайтов – развлечение. Были взяты сайты по продаже билетов и онлайн-кинотеатры (КиноПоиск, IVI, Яндекс Афиша).

Шестая категория – социальные сети. Для работы были взяты данные для «ВКонтакте», Instagram и YouTube.

#### Классические методы прогнозирования

Метод авторегрессии (AR). С помощью данного метода прогнозное значение находится как линейная функция, в которой учитываются предыдущие значения на временных шагах.

Метод авторегрессии  $p$ -го порядка  $AR(p)$  определяется как

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \alpha_i X_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $\alpha_1, \dots, \alpha_p$  – параметры модели;  $c$  – постоянная;  $\varepsilon_t$  – белый шум.

Метод скользящего среднего (MA). С помощью данного метода значение на следующем шаге находится как линейная функция, в которой учитываются остаточные ошибки из среднего на предыдущих временных шагах.

Модель скользящего среднего порядка  $q$   $MA(q)$  определяется следующим образом:

$$X_t = \sum_{j=0}^q b_j \varepsilon_{t-j}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_t$  – белый шум,  $b_j$  – параметры модели ( $b_0$  принято считать равным 1).

Метод авторегрессионного скользящего среднего (ARMA). Данный метод объединяет модели авторегрессии (AR) и скользящей средней (MA). С помощью данного метода значение на следующем шаге находится как линейная функция, в которой учитываются значения и случайные ошибки на предыдущих временных шагах.

Модель авторегрессионного скользящего среднего, где  $p$  и  $q$  – целые числа, которые задают порядок модели  $ARMA(p, q)$ , определяется следующим образом:

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \alpha_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_i \varepsilon_{t-i}, \quad (3)$$

где  $c$  – константа,  $\varepsilon_t$  – белый шум,  $\alpha_1, \dots, \alpha_p$  – коэффициенты авторегрессии и  $\beta_1, \dots, \beta_q$  – коэффициенты скользящего среднего.

Метод сезонного авторегрессионного интегрированного скользящего среднего (SARIMA). Данный метод объединяет модель  $ARIMA$ , которая, в свою очередь, включает в себя модель авторегрессии, дифференцирования и скользящего среднего на сезонном уровне. С помощью данного метода значение на следующем шаге находится как линейная функция, в которой учитываются разностные наблюдения, ошибки, разностные сезонные наблюдения, а также сезонные ошибки на предыдущих временных шагах.

Модель  $ARIMA(p, d, q)$ , где  $p$ ,  $d$  и  $q$  – целые числа, которые задают порядок модели, определяется как

$$\Delta^d X_t = c + \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta^d X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \beta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (4)$$

где  $c$  – константа,  $\varepsilon_t$  – белый шум,  $\alpha_i, \beta_j$  – параметры модели,  $\Delta^d$  – оператор разности временного ряда порядка  $d$ .

Метод сезонной авторегрессионной интегрированной скользящей средней с экзогенными регрессорами (SARIMAX). Данный метод объединяет модель  $SARIMA$ , которая также включает моделирование экзогенных переменных.

Метод векторной авторегрессии (VAR). Данный метод использует модель авторегрессии (AR), с помощью которой моделирует следующий шаг в каждом временном ряду. Метод (VAR) является обобщением авторегрессии (AR) на несколько параллельных временных рядов.

Метод скользящей средней векторной авторегрессии (VARMA). Данный метод использует модель авторегрессионного скользящего среднего, с помощью которой моделирует следующий шаг в каждом временном ряду. Метод (VARMA) также является обобщением авторегрессии  $ARMA$  на несколько параллельных временных рядов.

Метод простого экспоненциального сглаживания (SES). С помощью данного метода значение на следующем шаге находится как экспоненциально взвешенная линейная функция, в которой учитываются предыдущие значения на временных шагах.

Данный метод также известен как метод простого экспоненциального сглаживания, или метод Брауна.

$$S_t = \{c_1 : t = 1; S_{t-1} + \alpha(c_t - S_{t-1}) : t > 1, \quad (5)$$

где  $S_t$  – сглаженный ряд,  $c_t$  – исходный ряд,  $\alpha$  – коэффициент сглаживания, который выбирается априори (от 0 до 1).

#### Рекуррентные нейронные сети LSTM

LSTM является одной из разновидностей рекуррентных нейронных сетей. LSTM – мощный тип нейронной сети, которая способна к обучению долговременным зависимостям.

LSTM для однофакторного прогнозирования временных рядов. В данном случае модель будет обучаться, используя только один признак – поисковые запросы для сайта; обученная модель будет использоваться для прогнозирования будущих значений.

LSTM для многофакторного прогнозирования временных рядов. При многофакторном прогнозе будут учитываться не только поисковые запросы для сайта. Для сферы туризма также будет использоваться курс доллара к рублю.

#### Эксперимент и анализ результатов

Были реализованы описанные выше методы. При этом было реализовано четыре вида рекуррентных НС: Vanilla LSTM; LSTM с накоплением; двунаправленный LSTM; многомерные модели LSTM.

Для сравнение полученных результатов использовалась средняя абсолютная ошибка в процентах:

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}. \quad (6)$$

Данная ошибка использовалась, потому что она показывает процент, что удобно при использовании нескольких наборов данных.

Для категорий «туроператор» и «сайты для покупки авиабилетов» – метод с наименьшей ошибкой – многомерные модели LSTM. Для категории «социальные сети» – метод с наименьшей ошибкой – SARIMA. Для категории «магазины» – метод, который содержит наименьшую ошибку – SARIMAX. Для категории «кинотеатры» – метод с наименьшей ошибкой – LSTM с накоплением. И для категории «СМИ» – метод с наименьшей ошибкой – двунаправленный LSTM.

### Заключение

При сравнении среднего значения абсолютной ошибки в процентах для всех методов по каждому ряду данных можно отметить, что все модели рекуррентной нейронной сети в большинстве случаев были лучше, чем классические методы.

Минимальное значение при одномерном прогнозировании показал метод LSTM с накоплением со значением 38,0688 для всех рядов данных. Для многомерного прогнозирования минимальное значение ошибки – многомерные модели LSTM со значением 42,5449.

### Литература

1. Крючин О.В. Прогнозирование временных рядов с помощью искусственных нейронных сетей и регрессионных моделей на примере прогнозирования котировок валютных пар / О.В. Крючин, А.С. Козадаев, В.П. Дудаков // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2010. – № 30. – С. 354–362.
2. Web Traffic Time Series Forecasting using ARIMA and LSTM RNN / T. Shelatkar, S. Tondale, S. Yadav, S. Ahir // ITM Web of Conferences. – 2020. – No. 32. – P. 3017.
3. Новиков А.А. Анализ методов прогнозирования временных рядов / А.А. Новиков, Е.О. Будзинская, О.Н. Канева // Информационный бюллетень Омского научно-образовательного центра ОМГ: матер. X Междунар. молодежной науч.-практ. конф. с элементами научной школы. – Омск: Ом. гос. техн. ун-т, 2020. – С. 37–43.

4. Kandanand K. A Comparison of Various Forecasting Methods for Autocorrelated Time Series // International Journal of Engineering Business Management. – 2012. – No. 4.

5. Gülay E. Comparing Simple Forecasting Methods and Complex Methods: A Frame of Forecasting Competition // Scientific Annals of Economics and Business. – 2018. – No. 65. – P. 159–169.

6. Лепешкина Н.Д. Сравнение прогнозов пассажиропотока в аэропорту Пулково с помощью методов прогнозирования в программе STATISTICA / Н.Д. Лепешкина, С.А. Андронов // Системный анализ и логистика. – 2020. – № 25. – С. 18–24.

7. Сурков Ф.А. Сравнение временных рядов и нейросетевых методов в задаче прогнозирования стоимости и оценки недвижимости / Ф.А. Сурков, Н.В. Петкова, С.Ф. Суховский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – № 22. – С. 88–103.

8. Dabakoglu C. Time Series Forecasting – ARIMA, LSTM, Prophet with Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/@cdabakoglu/time-series-forecasting-arima-lstm-prophet-with-python-e73a750a9887> (дата обращения: 20.02.2021).

9. Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review / A. Zendeheboudi, B.M. Abdul, R. Saidur // Journal of Cleaner Production. – 2018. – No. 199. – P. 272–285.

10. Sharma A. Web Traffic Forecasting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/web-traffic-forecasting-f6152ca240cb> (дата обращения: 01.03.2021).

11. Hochreiter S. Long Short-term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural computation. – 1997. – No. 9. – P. 1735–1780.

12. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio / A. Oord, S. Dieleman, H. Zen et al. – 2016.

13. Митрохин В.Е. Прогнозирование мобильного трафика из необработанных данных с использованием сетей LSTM / В.Е. Митрохин, И.Н. Башков // Радиотехника, электроника и связь: сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Ом. науч.-исслед. ин-т приборостроения, 2019. – С. 117–123.

**Шайдорова Вера Сергеевна**

Студентка каф. БИС ТУСУРа

Эл. почта: shaydorova.vera@mail.ru

А.О. Слезкин, И.А. Ходашинский

## Определение размера популяции для алгоритма стаи ласточек при решении задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора

Рассматривается девять модификаций метода определения размера популяции для алгоритма стаи ласточек при оптимизации параметров нечеткого классификатора. Размер популяции является важным параметром любого популяционного алгоритма, от него зависят надежность и вычислительные затраты алгоритма. Были рассмотрены модификации, использующие для определения размера популяции параметры набора данных – количество входных признаков, количество классов и количество экземпляров в обучающей выборке. В ходе эксперимента было установлено, что предложенные модификации не оказывают статистически значимого влияния на скорость сходимости алгоритма оптимизации. С помощью теста Фридмана и построения Парето фронта была определена модификация, позволяющая достичь компромисса между ошибкой классификации и скоростью оптимизации.

**Ключевые слова:** нечеткий классификатор, инициализация популяции, алгоритм стаи ласточек, оптимизация параметров, машинное обучение.

Метаэвристические алгоритмы оптимизации, или «метаэвристики», – стохастические алгоритмы, позволяющие находить (суб)оптимальные решения задач большой размерности за приемлемое время. Метаэвристики делятся на траекторные и популяционные. Траекторные формируют последующее решение на основе единственного предыдущего решения, популяционные – на основе множества предыдущих решений и накопленного опыта. Среди популяционных алгоритмов выделяют два наиболее распространенных класса: эволюционные и роевые [1].

Алгоритм стаи ласточек – популяционный роевой алгоритм, который обладает некоторыми особенностями, отличающими его от других алгоритмов. К таким особенностям относятся разделение всей популяции на несколько субпопуляций и использование нескольких типов частиц, каждый из которых выполняет особую роль. Благодаря указанным особенностям алгоритм имеет хорошую скорость сходимости и справляется с проблемой выхода из локальных оптимумов [2, 3]. Алгоритм используется для решения задач управления узлами в сенсорных сетях [4], для оптимизации параметров цифрового фильтра [5], для решения проблемы выбора тестов, для диагностики неисправностей [6].

Размер популяции является важным параметром любого популяционного алгоритма, от него зависят надежность и вычислительные затраты алгоритма. Если размер популяции недостаточно большой, то это может привести к быстрой сходимости и «застреванию» в локальном оптимуме. Однако чрезмерно большой размер популяции может привести, наоборот, к слишком медленной сходимости и неприемлемо большим временным затратам. Часто размер популяции вычисляют, исходя из размерности признакового пространства поиска [7–10].

Решение многих прикладных задач сводится к решению задачи классификации. Для описания взаимосвязи между признаками объекта и его принадлежности к определенному классу используются нечеткие правила, объявленные в нечетком классифика-

торе. Интерпретируемость правил и устойчивость к неполным данным являются основными преимуществами нечетких классификаторов [11]. Понятная архитектура, а также множество различных методик обучения позволили нечетким системам занять одно из ключевых мест в сфере интеллектуального анализа данных [12–14].

Цель работы – сравнительный анализ модификаций метода определения размера популяции для алгоритма стаи ласточек при решении задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора.

### Нечеткий классификатор

Правила нечеткого классификатора имеют следующий вид [15]:

$$\text{IF } x_1 = A_{1j} \text{ AND } x_2 = A_{2j} \text{ AND } \dots$$

$$\text{AND } x_n = A_{nj} \text{ THEN class} = c_j,$$

где  $j = \overline{1..m}$ ,  $m$  – количество правил;  $A_{ij}$  – терм  $j$ -го правила  $i$ -й переменной;  $c_j$  – идентификатор класса  $j$ -го правила.

Нечеткий классификатор может быть представлен как

$$C = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}),$$

где  $\mathbf{x}$  – входной вектор,  $\boldsymbol{\theta}$  – вектор параметров функций принадлежности antecedентов.

Тогда задачей оптимизации параметров функций принадлежности будет являться нахождение такого вектора параметров  $\boldsymbol{\theta}$ , при котором качество классификации входных данных будет максимальным.

### Алгоритм стаи ласточек

Алгоритм стаи ласточек основан на поведении стаи ласточек при длительных перелетах и поиске пищи в естественной среде обитания [2].

Вся популяция в алгоритме разделена на три вида частиц: лидеры, исследователи и бесцельные. Роль частицы выбирается в зависимости от её положения в исследуемом пространстве.

Лидеры подразделяются на глобальных и локальных. Глобальный лидер только один, и им является частица с самым лучшим положением в про-

блемном пространстве. Локальные лидеры –  $l$  следующих за глобальным лидером частиц. Бесцельные частицы –  $k$  частиц с самым худшим положением. Остальные частицы – исследователи.

Во время итерации частицы лидеры не перемещаются, а на основании их положения рассчитываются векторы перемещения остальных частиц. Перед каждой итерацией роли частиц перераспределяются.

Перемещение частицы исследователя определяется исходя из положения глобального лидера, положения ближайшего локального лидера и лучшего положения этой частицы за все время оптимизации. Формулы движения исследователя приведены ниже:

$$\theta_{e_{i+1}} = \theta_{e_i} + V_{i+1},$$

$$V_{i+1} = VHL_{i+1} + VLL_{i+1},$$

$$VHL_{i+1} = \text{rand}(0,1) * (\theta_{e_{\text{best}}} - \theta_{e_i}) + \text{rand}(0,1) * (HL - \theta_{e_i}),$$

$$VLL_{i+1} = \text{rand}(0,1) * (\theta_{e_{\text{best}}} - \theta_{e_i}) + \text{rand}(0,1) * (LL - \theta_{e_i}),$$

где  $\theta_{e_i}$  – положение  $i$ -й частицы-исследователя,  $HL$  – положение глобального лидера,  $LL_i$  – положение ближайшего до  $\theta_{e_i}$  локального лидера,  $\theta_{e_{\text{best}}}$  – лучшее положение  $\theta_{e_i}$ ,  $V_i$  – вектор скорости  $\theta_{e_{\text{best}}}$ ,  $VHL$  – вектор скорости частицы относительно  $VL$ ,  $VLL$  – вектор скорости частицы относительно  $LL$ ,  $\text{rand}(0;1)$  – случайное число в промежутке от 0 до 1.

Бесцельные частицы перемещаются в случайное место проблемного пространства. Для этого используются следующие формулы:

$$\theta_{o_{i+1}} = \text{rand}(0,5; 2) * VSS, \quad VSS = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} \theta_i}{N-k},$$

где  $\theta_{o_i}$  – положение  $i$ -й бесцельной частицы,  $\theta_i$  –  $i$ -я частица популяции,  $N$  – количество всех частиц в популяции,  $k$  – количество бесцельных частиц.

#### Модификации метода определения размера популяции

В [7] автор для автоматического расчета количества частиц использовал формулу

$$N = \text{int}(10 + k * \sqrt{F}), \quad (1)$$

где  $F$  – количество признаков,  $\text{int}$  – целая часть решения,  $k$  – положительный целочисленный коэффициент, автором предлагается использовать значение  $k = 2$ .

В данной статье предлагается несколько альтернативных формул расчета количества частиц, основанных на вышеприведенной формуле. Авторы исходили из предположения, что использование только одного параметра набора данных – количества признаков и фиксированного коэффициента  $k$  – недостаточно для гибкого определения размера популяции.

Авторами данной статьи предлагается заменить количество признаков на произведение количества признаков и количества классов исследуемого набора данных, а также варьировать коэффициент  $k$ . Тогда формула приобретает следующий вид:

$$N = \text{int}(10 + k * \sqrt{F * C}), \quad (2)$$

где  $C$  – количество классов в наборе данных.

Ещё один вариант модификации исходной формулы состоит в использовании количества экземпляров обучающего набора данных вместо константы. Измененная формула будет иметь следующий вид:

$$N = \text{int}(\sqrt[3]{E} + k * \sqrt{F * C}), \quad (3)$$

где  $E$  – количество экземпляров в обучающем наборе данных.

#### Описание эксперимента

В качестве наборов данных было выбрано 34 набора данных из репозитория KEEL (<http://keel.es/>). Эксперимент проводился по схеме десятикратной кроссвалидации.

В качестве классификатора использовался нечеткий классификатор. В качестве алгоритма оптимизации использовался алгоритм стаи ласточек.

При проведении эксперимента оценивались три параметра – ошибка классификации на тестовых данных, последняя итерация, на которой изменялось лучшее решение (скорость сходимости), и время, затраченное на процесс оптимизации параметров.

Для определения размера популяции использовались (1)–(3). Коэффициент  $k$  для каждой из формул варьировался от 1 до 3.

Описание наборов данных и результаты эксперимента для всех модификаций метода определения размера популяции представлены в [16].

Для статистической оценки результатов использовался критерий Фридмана. В табл. 1 приведены полученные ранги, в табл. 2 – значения p-value.

Таблица 1

Значения рангов, полученные с помощью теста Фридмана для оцениваемых параметров

Формула	Ошибка	Сходимость	Время
1, $k=1$	6,279	4,471	1,588
1, $k=2$	6,279	5,088	3,25
1, $k=3$	5,176	4,647	5,265
2, $k=1$	5,75	5,235	3,868
2, $k=2$	4,706	5,059	6,618
2, $k=3$	3,412	4,794	8,412
3, $k=1$	4,956	5,941	2,765
3, $k=2$	4,676	4,882	5,382
3, $k=3$	3,765	4,882	7,853

Таблица 2

Значения p-value для оцениваемых параметров

	Ошибка	Сходимость	Время
p-value	1,26E-05	0,595	1,97E-38

Как видно из табл. 2, значение p-value больше уровня значимости 0,05 только для одного из оцениваемых параметров – скорости сходимости. Таким образом, можно сделать вывод, что размер популяции при использовании рассматриваемых модификаций для его определения оказывает статистически значимое влияние только на два из оцениваемых параметров – ошибку на тестовой выборке и время оптимизации. Поэтому было принято решение не использовать значения по скорости сходимости для дальнейшего анализа.

На основе полученных рангов был построен Парето-фронт (рис. 1).

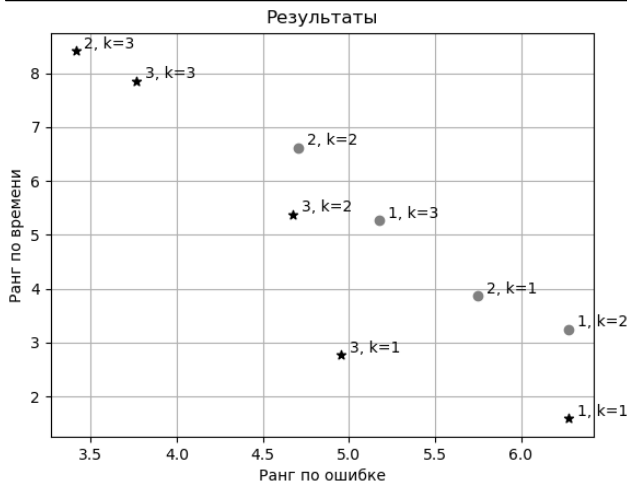


Рис. 1. Парето-фронт: ★ – точки, входящие в Парето-фронт; ● – точки, не входящие в Парето-фронт

Как видно на рис. 1, в Парето-фронт попало пять модификаций.

Для определения наилучшего значения Парето-фронта, представленного на рис. 1, использовался метод идеальной точки. Рассчитанные значения расстояний представлены в табл. 3

Таблица 3

Значения Евклидова расстояния до идеальной точки на Парето-фронте					
Формула	2, k = 3	3, k = 3	3, k = 2	3, k = 1	1, k = 1
Расстояние	9,08	8,71	7,13	5,68	6,48

В данном случае лучшее значение показала модификация, основанная на (3), со значением коэффициента  $k = 1$ .

#### Заключение

В ходе данной работы было рассмотрено девять модификаций метода определения размера начальной популяции для алгоритма стаи ласточек при решении задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора. Для каждой из модификаций был построен классификатор, по результатам работы которого оценивались три параметра: ошибка классификации, скорость сходимости и время оптимизации. Основываясь на критерии Фрийдмана, было выявлено, что размер популяции при использовании рассматриваемых модификаций для его определения, не оказывает статистически значимого влияния на скорость сходимости. По двум другим критериям был построен Парето фронт. Основываясь на Евклидовом расстоянии до идеальной точки, была выявлена модификация метода определения размера начальной популяции, позволяющая достичь компромисса между качеством классификации и временем оптимизации.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEWM-2020-0042).

#### Литература

1. Hodashinsky I.A. Methods for Improving the Efficiency of Swarm Optimization Algorithms. A Survey // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, No. 6. – P. 935–967.

2. Neshat M. Swallow swarm optimization algorithm: a new method to optimization / M. Neshat, G. Sepidnam, M. Sargolzaei // Neural Computing and Application. – 2013. – Vol. 23, No. 2. – P. 429–454.

3. Neshat M. A new hybrid optimization method inspired from swarm intelligence: Fuzzy adaptive swallow swarm optimization algorithm (FASSO) / M. Neshat, G. Sepidnam // Egyptian Informatics Journal. – 2015. – Vol. 16, No. 3. – P. 339–350.

4. Nithya A. Node Weight Swallow Swarm Optimization Convex Node Segmentation (Nws<sup>2</sup>cns) Algorithm for Distributed 3-D Localization in Wireless Sensor Networks (Wsns) / A. Nithya, Dr.A. Kavitha // International Journal of Scientific & Technology Research. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 5130–5137.

5. Sarangi S.K. Design of optimal low-pass filter by a new Levy swallow swarm algorithm / S.K. Sarangi, R. Panda, A. Abraham // Soft Computing. – 2020. – Vol. 24. – P. 18113–18128.

6. Yao Z. Optimal Selection of Tests for Fault Diagnosis in Multi-Path System with Time-delay / Z. Yao, L. Zhu, T. Zhang, J. Wang // Journal of Electronic Testing. – 2020. – Vol. 36. – P. 75–86.

7. Clerc M. From Theory to Practice in Particle Swarm Optimization // Handbook of Swarm Intelligence. – Berlin: Springer, 2011. – Vol. 8. – P. 3–36.

8. Dimension-by-dimension enhanced cuckoo search algorithm for global optimization / L. Chen, H. Lu, H. Li, G. Wang, L. Chen // Soft Comput. – 2019. – Vol. 23. – P. 11297–11312.

9. Singh A. Artificial Bee Colony algorithm with improved search mechanism / A. Singh, K. Deep // Soft Comput. – 2019. – Vol. 23. – P. 12437–12460.

10. Gupta S. Grey Wolf Optimiser for continuous optimisation problems / S. Gupta, D.K. Cauchy // J. Exp. Theor. Artif. Intell. – 2018. – Vol. 30. – P. 1051–1075.

11. Carmona P. FuzzyFeatureRank. Bringing order into fuzzy classifiers through fuzzy expressions / P. Carmona, J.L. Castro // Fuzzy Sets and Systems. – 2020. – Vol. 401. – P. 78–90.

12. Hu X. Fuzzy classifiers with information granules in feature space and logic-based computing / X. Hu, W. Pedrycz, X. Wang // Pattern Recognition. – 2018. – Vol. 80. – P. 156–167.

13. Hodashinsky I.A. Algorithms of the tradeoff between accuracy and complexity in the design of fuzzy approximators / I.A. Hodashinsky, I.V. Gorbunov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49. – P. 569–577.

14. Lavygina A. Hybrid algorithm for fuzzy model parameter estimation based on genetic algorithm and derivative based methods / A. Lavygina, I. Hodashinsky // ECTA 2011: Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications and International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications. – 2011. – P. 513–515.

15. Bardamova M. A fuzzy classifier with feature selection based on the gravitational search algorithm / M. Bardamova, A. Konev, I. Hodashinsky, A. Shelupanov // Symmetry. – 2018. – Vol. 10, No. 11. – P. 609.

16. Методы определения размера популяции для алгоритма стаи ласточек при решении задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.mendeley.com/drafts/pdd4mvs777>, свободный (дата обращения: 14.09.2021).

#### Слезкин Артем Олегович

Аспирант каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: saotom724@gmail.com

#### Ходашинский Илья Александрович

Д-р техн. наук, проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: hodashn@gmail.com

УДК 004.896

Б.Д. Цыбенков, М.О. Светлаков

## Отбор и выделение признаков сигнала ЭЭГ с помощью вейвлет-преобразования для аутентификации пользователя

Представлены результаты исследования в области применения электроэнцефалографии (ЭЭГ) для аутентификации пользователя с использованием вейвлет-преобразования. Был использован набор данных Leipzig Study for Mind-Body-Emotion Interactions dataset (LEMON). В качестве признаков используются три статистических критерия с каждого канала. Для отбора признаков используются методы на основе корреляции, взаимной информации и на основе критерия  $\chi^2$ , а также дисперсионный анализ. Для классификации в работе используется SVM-модель. **Ключевые слова:** электроэнцефалограмма, аутентификация, вейвлет, машинное обучение, выделение признаков, классификация, отбор признаков.

В настоящее время наиболее распространенной системой аутентификации является аутентификация на основе паролей. Возможный пользователь получает доступ к работе, вводя в компьютер пароль, например, в виде заранее определенного для него слова, чтобы подтвердить свою личность. Надежность пароля определяется его длиной и ограничениями на используемые символы, поэтому пользователям необходимо формировать длинные последовательности, чтобы использовать надежный пароль, что не очень удобно [1]. Применение парольной идентификации с надежным паролем для подтверждения личности пользователя в процессе выполнения каких-либо мероприятий нежелательно в связи с невозможностью реализации фоновой проверки без привлечения внимания пользователя [2].

Альтернативой аутентификации с помощью паролей является биометрическая аутентификация [3]. Данный метод использует уникальные биологические характеристики человека для распознавания. Можно привести несколько наиболее часто используемых биометрических признаков, таких как отпечаток пальца руки или ладони, рисунок оболочки глаза, тембр и спектральный образ голоса, изображение лица, рисунок подписи [4]. Существуют некоторые требования, которые необходимо выполнить, чтобы биометрические признаки можно было применять в реальных условиях. В частности, признаки должны быть универсальны, постоянны и измеримы, а системы идентификации должны обладать высокой производительностью и распознавать личность с достаточной для практического применения точностью [5].

Опираясь на работу [6], где рассматривались коэффициенты вейвлет-преобразования одного уровня и точность классификации на больших наборах данных значительно снижалась, была выдвинута гипотеза, что для повышения точности необходимо рассматривать коэффициенты со всех уровней.

Однако в таком случае количество признаков сильно увеличивается, что существенно замедляет работу алгоритма. Для ускорения работы алгоритма и повышения точности классификации необходимо рассмотреть методы отбора признаков [7].

Целью работы является снижение размерности коэффициентов вейвлет-преобразования для повышения точности и скорости работы алгоритма.

Для исследования был взят набор данных – Leipzig Study for Mind-Body-Emotion Interactions dataset (LEMON). Участники набора данных были тщательно осмотрены на физическое и психологическое состояние врачами и представляли различные возрастные группы [8].

### Набор данных

Данные LEMON были собраны с 2013–2015 гг. из Day Clinic for Cognitive Neurology of the University Clinic Leipzig and the Max Planck Institute for Human and Cognitive and Brain Sciences (MPI CBS). Набор данных был опубликован в 2019 г. и состоит из 227 участников.

ЭЭГ в состоянии покоя было измерено только для 216 участников, где записи ЭЭГ каждого участника велись сессией по 16 мин. Каждая сессия состоит из 16 блоков по 60 с, где 8 блоков были записаны с открытыми глазами и 8 – с закрытыми. Для крепления электродов применялась схема 10-20.

### Преобработка

Авторы набора данных исключили данные 13 участников (некоторая информация о событиях отсутствовала) и некоторые каналы (плохое качество сигнала). Далее была проведена децимация полученного сигнала и применен полосовой фильтр (Баттерворта 8-го порядка). Также были применены метод главных компонент (PCA) и метод независимых компонент (ICA) для снижения размерности данных.

Так, было снижено количество каналов записей до 17 и выбраны только те, которые были в каждой сессии (AF3, C2, C3, CP3, CP5, F4, Oz, P1, P2, P4, P5, P6, P8, PO3, PO4, PO8, Pz), полученные данные с каналов были разделены на эпохи длительностью 2 с. В результате был получен набор данных (203 участника  $\times$  17 каналов  $\times$  480 эпох).

### Выделение признаков

Для выделения признаков было применено дискретное вейвлет-преобразование. Оно декомпозирует сигнал в базовые вейвлет-функции (материнские вейвлеты). Применяется 2 фильтра для разделения сигнала на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты и представляющие собой низкие и высокие частоты соответственно. В итоге вейвлет-преобразование можно описать следующим образом:

$$WT_x(j, k) = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt, \quad (1)$$

где  $x(t)$  – сигнал,  $\psi$  – вейвлет-функция.

В данной работе использован вейвлет Добеши 4-го порядка для декомпозиции сигнала на 5 уровней. Такое разделение позволяет извлечь определенные частоты сигнала ЭЭГ, соответствующие «ритмам мозга» (Альфа (8–16 Гц), Бета (16–32 Гц), Гамма (32–64), Дельта (0,5–4 Гц), Тета (4–8 Гц)). Так все 5 уровней будут использованы для выделения 3 статистических признаков с каждого канала:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (2)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}, \quad (3)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|X_i|)^2}, \quad (4)$$

где  $X_i$  – уровень декомпозиции ЭЭГ сигнала,  $N$  – количество полученных коэффициентов после вейвлет-преобразования.

Схема выделения признаков представлена на рис. 1.

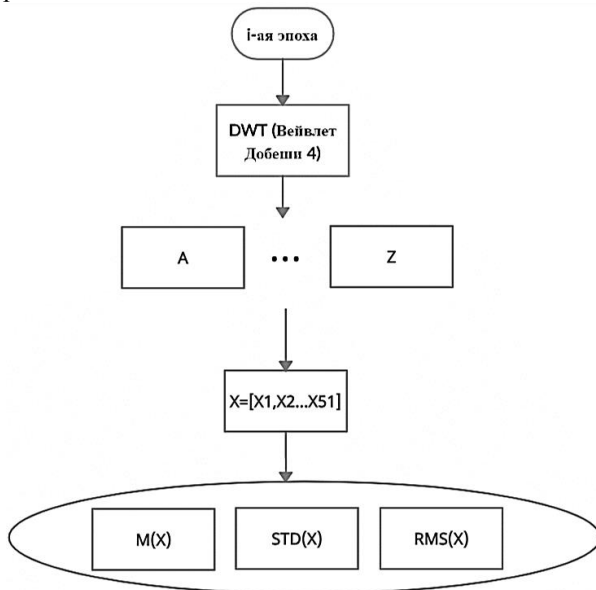


Рис. 1. Схема выделения признаков из сигнала ЭЭГ

### Отбор признаков

Для отбора признаков было рассмотрено 4 метода: на основе корреляции, взаимной информации, критерия  $\chi^2$  и дисперсионный анализ (ANOVA).

Отбор признаков на основе корреляции можно описать следующим образом: хорошее подмножество признаков содержит такие признаки, которые хорошо коррелируют с целевой переменной (классом) и при этом не коррелируют друг с другом. Данный метод можно описать следующей формулой:

$$CFS = \max S_k \left[ \frac{r_{cf_1} + r_{cf_2} + \dots + r_{cf_k}}{\sqrt{k + 2(r_{f_1 f_2} + \dots + r_{f_i f_j} + \dots + r_{f_k f_1})}} \right], \quad (5)$$

где  $S_k$  – поднабор признаков, состоящий из  $k$  признаков,  $r_{cf}$  – значение корреляции между признаком и классом,  $r_{ff}$  – значение корреляции между признаками.

Критерий  $\chi^2$  используется для проверки независимости двух переменных. В данном случае между классом и признаком [9].

Дисперсионный анализ (ANOVA), позволяет оценить значимость различий средних значений между группами. Метод выделяется простотой реализации, скоростью работы, и алгоритм работает эффективно, даже если размер групп разный [10].

Отбор признаков на основе взаимной информации основывается на выборе признаков с помощью взаимной информации минимальной избыточности и максимальной релевантности, где критерий максимальной релевантности находит подмножество признаков такое, что оно максимизирует среднее значение взаимной информации признака и класса по всем признакам, включенным в подмножество. Если пользоваться только критерием максимальной релевантности, то может оказаться, что у выбранных признаков наблюдается высокая избыточность, т.е. они могут быть значительно зависимы друг от друга. Поэтому рассматривается также критерий минимальной избыточности [11].

### Результаты

В работе была проведена 5-блочная кроссвалидация, которая показана на рис. 2. Данные с обоих состояний (глаза открыты и глаза закрыты) были использованы в задаче классификации с использованием классификатора SVM.

Результат работы алгоритма составляет 95,3% (процент правильной классификации) до отбора признаков.

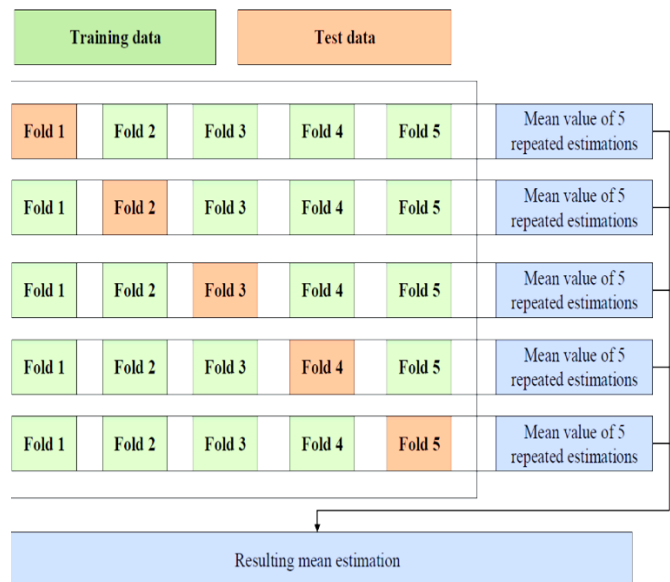


Рис. 2. Схема 5-блочной кроссвалидации

Так, в табл. 1–4 представлены результаты, полученные после отбора признаков указанными выше методами.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что лучшим по точности классификации является метод на основе взаимной информации при отборе 60% и составляет 96,4%.

Точность классификации увеличилась с 40 до 95,3% после использования алгоритма выделения признаков на всех уровнях вместо одного на больших выборках участников.

Таблица 1

**Результаты отбора на основе  $\chi^2$ -критерия**

Процентиль наиболее информативных признаков на основании $\chi^2$ -критерия	Точность классификации	Количество отобранных признаков
90	0,897	275
80	0,900	244
70	0,898	214
60	0,896	183
50	0,881	153
40	0,850	122
30	0,789	91
20	0,670	61
10	0,410	30

Таблица 2

**Результаты отбора на основе критерия ANOVA**

Процентиль наиболее информативных признаков на основании критерия ANOVA	Точность классификации	Количество отобранных признаков
90	0,95600	275
80	0,96100	244
70	0,96300	214
60	0,96298	183
50	0,95800	153
40	0,94000	122
30	0,90000	91
20	0,82000	61
10	0,69000	30

Таблица 3

**Результаты отбора на основе взаимной информации**

Процентиль наиболее информативных признаков на основании критерия взаимной информации	Точность классификации	Количество отобранных признаков
90	0,955	275
80	0,958	244
70	0,961	214
60	0,964	183
50	0,958	153
40	0,943	122
30	0,895	91
20	0,820	61
10	0,667	30

Таблица 4

**Результаты отбора признаков на основе корреляции**

Значение коэффициента корреляции	Точность классификации	Количество отобранных признаков
0,10	0,9580	200
0,20	0,9530	170
0,30	0,9530	170
0,35	0,9530	170
0,40	0,9515	166
0,50	0,9000	136
0,55	0,8600	120
0,60	0,6900	102
0,65	0,4400	40

**Заключение**

Гипотеза об использовании коэффициентов со всех уровней для увеличения точности классификации на больших выборках данных подтвердилась. По итогам работы было выявлено, что в данной работе максимальная точность классификации после отбора признаков 96,4% и количество признаков 183.

В дальнейшем планируется рассмотреть другие классификаторы и проверить работу на других наборах данных.

*Литература*

1. Matsumoto T. Impact of Artificial «Gummy» Fingers on Fingerprint Systems // Proc. of SPIE, Optical Security and Counterfeit IV. San Jose. – 2002. – Vol. 4677. – P. 275–289.
2. Nixon K. Handbook of Biometrics, chap. Spoof detection schemes. – Boston: Springer, 2008. – P. 403–423.
3. Anoklin A. A genetic study of the human low-voltage electroencephalogram // Human Genetic. – 1992. – Vol. 90, № 1–2. – P. 99–112.
4. I think, therefore I am: Usability and security of authentication using brainwaves / J. Chuang, H. Nguyen, C. Wang, B. Johnson // In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2013.
5. A real-time electroencephalogram (EEG) based individual identification interface for mobile security in ubiquitous environment / B. Hu, Q. Liu, Zhao, Y. Qi, H. Peng // IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference, APSCC. – 2011 (in Proceedings).
6. Kaur B. Age and gender classification using brain-computer interface / B. Kaur, D. Singh, P. Roy // Neural Computing and Applications. – Mar. 2019. – Vol. 31. – P. 5887–5900.
7. Koller D. Toward optimal feature selection / D. Koller, M. Sahami // Proceedings of International Conference on Machine Learning. – 1996.
8. Babayan A. A mind-brain-body dataset of MRI, EEG, cognition, emotion, and peripheral physiology in young and old adults / A. Babayan, M. Erbey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/sdata2018308>, свободный (дата обращения: 16.02.2021).
9. Mahmood M. Two Feature Selection Methods Comparison Chi-square and Relief-F for Facial Expression Recognition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/17426596/1804/1/012056/pdf>, свободный (дата обращения: 16.02.2021).
10. Identification of bacteriophage virion proteins by the ANOVA feature selection and analysis / H. Ding, P. Feng, W. Chen, H. Lin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lab.malab.cn/~chenwei/pdf/201408.pdf>, свободный (дата обращения: 16.02.2021).
11. Bannasar M. Feature selection using joint mutual information maximization / M. Bannasar, Y. Hicks, R. Setchi // Expert Systems with Applications. – 2015. – No. 42 (22). – P. 8520–8532.

**Цыбенков Билигто Дашинимаевич**

Студент каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: biligto2025@mail.ru

**Светлаков Михаил Олегович**

М.н.с. лаб. съема, анализа и управления биологическими сигналами (ЛСАУБС) (ИСИБ) ТУСУРа  
Эл. почта: rvvincl@gmail.com



Д.А. Воронин, И.А. Ходашинский

## Алгоритм «ворон» для оптимизации параметров нечеткого классификатора

Рассмотрено применение популяционного алгоритма «ворон» для решения задачи оптимизации параметров функций принадлежности нечеткого классификатора. База правил классификатора сформирована алгоритмом генерации на основе экстремальных значений признаков. Проверка эффективности построенных нечетких классификаторов выполнена на 22 хорошо известных наборах реальных данных из репозитория KEEL. Выполнено сравнение с классификаторами, протестированными на аналогичных наборах данных. В качестве критериев сравнения выбраны процент ошибочной классификации и число правил в классификаторе. Результаты тестирования указывают на то, что с помощью алгоритма «ворон» могут быть разработаны классификаторы с минимально допустимым количеством правил при статистически неразличимой точности с классификаторами, построенными на гораздо большем наборе правил.

**Ключевые слова:** метаэвристика, алгоритм «ворон», оптимизация, нечеткий классификатор, функция принадлежности.

Классификация является одной из наиболее изучаемых проблем в области интеллектуального анализа данных и машинного обучения. Практические приложения классификации включают широкий спектр проблемных областей, таких как информационная безопасность и финансы, обработка текста и мультимедиа, анализ медицинских и биологических данных. Проблема может возникнуть в различных формах, таких как потоковая передача или неопределенные и несбалансированные данные. Решается проблема классификации с помощью различных методов, применение которых зависит от области приложения и решаемых задач [1]. Наиболее часто применяемыми методами являются деревья решений [2], машины опорных векторов [3], искусственные нейронные сети [4], байесовский классификатор [5], классификаторы на основе ближайших соседей [6].

В нашей статье рассматривается проблема построения нечетких классификаторов, особенность которых заключается в том, что классифицируемый объект может быть отнесен к тому или иному классу с определенной степенью уверенности. Главным преимуществом нечеткого классификатора, выделяющим его среди других моделей, является интерпретируемость нечетких правил, которые представляют собой лингвистические знания, понятные экспертам в рассматриваемой предметной области.

Процесс построения нечеткого классификатора включает три основных этапа: формирование базы нечетких правил, отбор информативных признаков, оптимизация параметров функций принадлежности нечетких правил. Наиболее часто применяемыми методами формирования базы нечетких правил являются гранулярные вычисления [7, 8], методы кластеризации [9, 10], алгоритм генерации базы правил по экстремальным значениям признаков классов [11, 12]. Отбор признаков позволяет удалить из таблиц наблюдений признаки, не влияющие на классификацию. В нашей работе этот этап не рассматривается. В процессе построения нечеткого классификатора важно выбрать оптимальные параметры функций принадлежности термов нечетких правил. Решается

эта задача с помощью методов, которые базируются на производных, либо с помощью метаэвристических алгоритмов [12–14]. Метаэвристики принадлежат множеству стохастических алгоритмов оптимизации, которые используют случайность для поиска оптимального (субоптимального) решения сложных задач. Одной из недавно разработанных и показавшей высокую эффективность метаэвристик является алгоритм «ворон» [15]. Указанный алгоритм был успешно применен для решения оптимизационных задач электроэнергетики [16], медицинской диагностики [17], информационной безопасности [18] и обработки изображения [19].

Цель нашей статьи – описание применения алгоритма «ворон» для решения задачи оптимизации параметров функций принадлежности термов нечеткого классификатора.

### Алгоритм «ворон»

Алгоритм «ворон» (АВ) был предложен А. Аскарзаде в 2016 г. АВ является представителем популяционных метаэвристических алгоритмов. Такие алгоритмы имитируют природные явления (коллективное поведение групп животных) и применяются для решения сложных задач оптимизации. Вороны – птицы, которые считаются одними из самых умных животных. Поведение вороньей стаи схоже с процессом оптимизации. Все вороны прячут свою пищу в тайниках до того момента, пока она им не понадобится. Как правило, спрятанной еды им мало в силу их жадности. Они начинают вести слежку друг за другом, а также за другими птицами, чтобы их обокрасть и найти тайник посытнее.

На первом шаге выполнения АВ задаются основные параметры. К таким параметрам относятся количество итераций, размер популяции  $N$ , вероятность осведомленности вороны  $AP$ , длина полета  $fl$ , границы пространства поиска. На втором шаге случайным образом генерируются позиции каждой из ворон (решения), а также происходит процесс формирования памяти – место, где находится их первоначальный тайник. Позиции вороны на итерации  $i$  в  $d$ -мерном в пространстве поиска определяется вектором

$$\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$$

Местоположение тайника ворон в памяти определяет лучшее решение, найденное вороной:

$$\mathbf{m}_i = [m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{id}]$$

Далее происходит вычисление значения целевой функции при текущих позициях. На третьем шаге для каждой вороны выбирается та ворона, за которой она погонится. В результате происходит процесс обновлений позиций. Данный процесс зависит от выполнения определенного условия, которое заключается в том, что если будет вычислена новая позиция вороны, которая выходит за границы пространства поиска, то в таком случае вороне будет присвоено граничное значение пространства поиска. На следующем этапе вычисляется целевая функция текущих позиций ворон. Полученное новое значение целевой функции сравнивается со значением целевой функции в памяти. Если новое значение оказывается лучшим, то память обновляется. Шаги выполняются до тех пор, пока не сработает условие останова.

Обновление позиции вороны на итерации  $k$  задается выражением

$$x_i^{k+1} = x_i^k + r_i \cdot fl_i^k \cdot (m_j^k - x_i^k), \text{ при } r \geq AP_j^k, \quad (1)$$

где  $x_i^k$  – текущая позиция вороны  $i$ ;  $r_i$  – случайно сгенерированное число от 0 до 1;  $AP_j^k$  – вероятность осведомленности вороны  $j$ ;  $fl_i^k$  – длина полета вороны  $i$ ;  $m_j^k$  – значение позиции из памяти вороны  $j$ .

В случае если условие, указанное в выражении (1), не выполняется, ворона перелетает в случайную позицию пространства поиска.

### Эксперимент и его результаты

Для генерации структуры нечеткого классификатора использовался алгоритм экстремальных значений признаков классов [11]. Данный алгоритм формирует начальную базу правил. Его сущность заключается в том, что на основе минимальных и максимальных значений каждого признака, присутствующего в таблице наблюдений, для каждого класса формируется ровно одно правило.

В рамках данной работы был проведен эксперимент на 22 различных наборах данных. Число прогнозов было зафиксировано значением в 10 запусков алгоритма. Также в рамках эксперимента количество итераций равно 500, параметр  $fl$  принят за 1,5, параметр  $AP$  равен 0,2, размер популяции  $N$  равен 40 воронам (решениям). Проект с нечетким классификатором реализован на языке Python. Тестирование проводилось на персональном компьютере, в котором установлен процессор Ryzen AMD 3700x с базовой тактовой частотой 3,7 ГГц, размер оперативной памяти равен 16 GB DDR4 3200 МГц. На время эксперимента было отключено стороннее программное обеспечение, интернет-соединение.

По завершении тестирования были получены средние значения ошибок, которые представлены в табл. 1. Столбцы TrainBefore и TestBefore – это ошибки классификации на обучающих и тестовых выборках после генерации правил до начала оптимизации параметров с помощью АВ. TrainAfter и TestAfter – это усредненные ошибки классификации на обучающих и тестовых выборках после применения АВ. Время указано в секундах с момента старта оптимизации до ее окончания.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Набор данных	Число признаков	Число экземпляров	TrainBefore	TrainAfter	TestBefore	TestAfter	Время, с
banana	2	5300	53,19	24,29	53,42	25,13	22,83
ecoli	7	336	54,13	25,48	54,80	31,30	15,58
glass	9	214	49,94	28,98	50,54	36,81	13,64
heart	13	270	32,67	12,65	32,96	18,96	8,61
ionosphere	33	351	20,39	8,92	20,24	13,98	15,65
newthyroid	5	215	4,19	0,68	4,59	3,99	6,62
phoneme	5	5404	25,27	19,39	25,15	20,43	25,30
pima	8	768	32,93	21,57	34,52	25,08	9,05
segment	19	2310	19,74	8,17	19,52	9,82	51,49
sonar	60	208	42,63	15,41	42,76	30,55	22,68
spambase	57	4597	60,58	10,39	60,58	11,26	97,99
spectfheart	44	267	19,56	11,43	19,12	20,62	18,27
vehicle	18	846	70,13	42,55	70,10	47,61	20,61
vowel	13	990	56,78	41,51	56,16	47,40	39,29
wdbc	30	569	7,42	2,46	8,09	5,75	15,73
haberman	3	306	46,19	19,16	45,73	25,26	6,59
hepatitis	19	80	72,99	3,7	71,1	14,2	10,46
page-blocks	10	5472	49,6	4,45	48,83	4,91	43,65
wisconsin	9	683	12,25	2,07	12	3,77	10,40
thyroid	21	7200	92,95	4,56	92,89	4,82	81,29
titanic	3	2201	32,3	21,37	32,3	21,76	13,42
twonorm	20	7400	3,96	3,17	3,91	3,63	70,78
Среднее значение			39,08	15,11	39,06	19,41	28,18

Сравнение значений ошибок с другими моделями

Набор данных	AB		D-MOFARC		FARC-HD		GSA	SWM	MLP	ЛР
	R	T	R	T	R	T	T	T	T	T
banana	2	25,13	8,7	11	12,9	14,5	27,2	34,96	10,51	42,91
glass	7	36,81	27,4	29,4	18,2	31	42,5	40,94	31,07	41,98
heart	2	18,96	18,7	15,6	27,8	16,3	15,9	18,89	15,56	15,56
newthyroid	3	3,99	9,5	4,5	9,6	5,6	1,9	7,92	3,64	11,15
phoneme	2	20,43	9,3	16,5	17,2	17,6	22,5	20,3	15,42	25,04
pima	2	25,08	10,4	24,6	20,2	23,8	26	21,63	22,54	22,93
segment	7	9,82	26,2	3,4	41,1	6,7	17,2	5,63	3,38	8,92
vehicle	4	47,61	22,4	29,4	31,6	32	50	23,33	18,19	24,67
haberman	2	25,26	9,2	18,3	5,7	26,5	25,6	26,47	26,11	25,15
hepatitis	2	14,2	11,4	10	10,4	11,3	10,1	15,95	19,62	15,95
page-blocks	5	4,91	21,5	3	18,4	5	9,2	6,39	4,64	5,55
wisconsin	2	3,77	9	3,2	13,6	3,8	3,7	3,07	3,5	3,07
thyroid	3	4,82	5,9	0,9	4,9	5,9	0,7	6,15	2,57	5,45
titanic	2	21,76	10,4	21,3	4,1	21,2	21,4	21,81	21,08	22,4
twonorm	2	3,63	10,2	6,9	60,4	4,9	5,6	2,15	2,27	2,22
Среднее значение	3,13	17,75	14,01	13,20	19,74	15,07	18,63	17,04	13,34	18,20

### Сравнительный анализ

Было произведено сравнение полученных результатов (AB) с доступными значениями ошибок со встроенной метаэвристикой в данный классификатор – Gravitational Search Algorithm (GSA) [20]. Также в сравнении участвовали нечеткие классификаторы D-MOFARC и FARC-HD [21], SWM, логистическая регрессия (ЛР), нейронная сеть (MLP) [20]. Средние значения ошибок по тестированию (T) для 15 наборов данных, а также количество правил (R) для реализованного классификатора и для аналогов D-MOFARC, FARC-HD приведены в табл. 2. Количество правил и признаков для AB и GSA совпадают.

Попарное сравнение значений нечеткого классификатора с AB с другими моделями классификаторов с применением критерия Уилкоксона при уровне значимости  $\alpha=0,05$  приведено в табл. 3. Также в табл. 3 указаны стандартизированная статистика критерия (ССК) и асимптотическая значимость.

Таблица 3

### Результаты статистического анализа Уилкоксона

Название	ССК	Асимптотическая значимость
D-MOFARC	-2,897	0,04
FARC-HD	-1,931	0,053
GSA	0,852	0,394
SWM	0,312	0,755
MLP	-2,50	0,012
ЛР	0,398	0,691

При сравнении с D-MOFARC, MLP можно наблюдать статистическое различие, так как асимптотическая значимость меньше принятого уровня значимости. Отрицательное значение ССК говорит о том, что данные классификаторы показали значения ошибки меньше, чем у AB. В данном случае классификатор-аналог сработал лучше, так как D-MOFARC имеет большее количество нечетких правил.

При сравнении с FARC-HD, GSA, SWM, ЛР можно заметить, что различия между выборками являются статистически незначимыми. Соответственно, медиана разностей данных классификаторов

с AB равна нулю. Нечеткий классификатор с применением AB показал значения ошибки на тестирование меньше, чем с применением GSA.

На основе результатов эксперимента была построена регрессионная модель зависимости времени обучения (T) от количества признаков (F) и экземпляров набора данных (E):

$$T = 0,008E + 0,657F.$$

95% доверительные интервалы имеют следующие значения: [0,006; 0,010] для F, [0,394; 0,919] для E. Интервалы не содержат нуля, значит, с заданной уверенностью можно считать статистически значимыми найденные коэффициенты регрессионной модели.

### Заключение

В результате проведенного эксперимента можно сделать вывод, что метаэвристика Crow Search Algorithm справляется со своей задачей. Она улучшает полученные значения ошибок нечетким классификатором. Преимущество данной метаэвристики перед другими заключается в простоте ее реализации. В сравнении с классификатором со встроенной метаэвристикой GSA CSA показывает ошибку меньше. В целом значение ошибки можно уменьшить за счет более тщательного подбора параметров метаэвристики, а также включения этапа отбора признаков для нечеткого классификатора.

### Литература

1. Aggarwal C.C. An Introduction to data classification / Data Classification: Algorithms and Applications. – New York: CRC Press, 2015. – P. 2–15.
2. Trabelsia A. Decision tree classifiers for evidential attribute values and class labels / A. Trabelsia, Z. Elouedi, E. Lefevre // Fuzzy Sets and Systems. – 2019. – Vol. 366. – P. 46–62.
3. Zhu W. Support vector machine classifier with huberized pinball loss / W. Zhu, Y. Song, Y. Xiao // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 91. – P. 103635.
4. Artificial neural networks for classifying the time series sensor data generated by medical detection dogs / L. Withington, D.D.P. de Vera, C. Guest, C. Mancini, P. Piwek // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 184. – P. 115564.

5. Yager R.R. An extension of the naive Bayesian classifier // *Information Sciences*. – 2006. – Vol. 176. – P. 577–588.
6. A generalized mean distance-based k-nearest neighbor classifier / J. Gou, H. Ma, W. Ou, S. Zeng, Y. Rao, H. Yang // *Expert Systems with Applications*. – 2019. – Vol. 115. – P. 356–372.
7. A novel extraction approach using Gaussian kernel-based granular computing / G. Dai, Y. Hu, Y. Yang, N. Zhang, A. Abraham, H. Liu // *Knowledge and Information Systems*. – 2019. – Vol. 61. – P. 821–846.
8. Zhao F. Granular rule-based modeling using the principle of justifiable granularity and boundary erosion clustering / F. Zhao, H. Guo, L. Wang // *Soft Computing*, 2021. – Vol. 25. – P. 9013–9023.
9. Guillaume S. Designing Fuzzy Inference Systems from Data: An Interpretability-Oriented Review // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2001. – Vol. 9. – P. 426–443.
10. Angelov P. An approach for fuzzy rule-base adaptation using on-line clustering // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2004. – Vol. 35. – P. 275–289.
11. Ходашинский И.А. Построение нечеткого классификатора на основе методов гармонического поиска / И.А. Ходашинский, М.А. Мех // *Программирование*. – 2017. – № 1. – С. 54–65.
12. Ходашинский И.А. Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии / И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2012. – № 10. – С. 15–20.
13. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем на базе алгоритма имитации отжига и методов, основанных на производных // *Информационные технологии*. – 2012. – № 3. – С. 14–20.
14. Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем на основе прямого алгоритма муравьиной колонии / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2011. – № 3. – С. 26–33.
15. Askarzadeh A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm // *Computers and Structures*. – 2016. – Vol. 169. – P. 1–12.
16. Karthikumar K. A new opposition crow search optimizer-based two-step approach for controlled intentional islanding in microgrids / K. Karthikumar, V.S. Kumar // *Soft Computing*. – 2021. – Vol. 25. – P. 2575–2588.
17. Anter A.M. Feature selection strategy based on hybrid crow search optimization algorithm integrated with chaos theory and fuzzy c-means algorithm for medical diagnosis problems / A.M. Anter, M. Ali // *Soft Computing*. – 2020. – Vol. 24. – P. 1565–1584.
18. SaiSindhuTheja R. An efficient metaheuristic algorithm based feature selection and recurrent neural network for DoS attack detection in cloud computing environment / R. SaiSindhuTheja, G.K. Shyam // *Applied Soft Computing Journal*. – 2021. – Vol. 100. – P. 106997.
19. Patil B.H. Crow search algorithm with discrete wavelet transform to aid Mumford Shah inpainting model / B.H. Patil, P.M. Patil // *Evolutionary Intelligence*. – 2018. – Vol. 11. – P. 73–87.
20. Bardamova M. et al. A fuzzy classifier with feature selection based on the gravitational search algorithm // *Symmetry*. – 2018. – Vol. 10, No. 11. – P. 609.
21. Fazzolari M. A multi-objective evolutionary method for learning granularities based on fuzzy discretization to improve the accuracy-complexity trade-off of fuzzy rule-based classification systems: D-MOFARC algorithm / M. Fazzolari, R. Alcalá, F. Herrera // *Applied Soft Computing*. – 2014. – Vol. 24. – P. 470–481.

---

**Воронин Данил Александрович**

Студент каф. БИС ТУСУРа  
Эл. почта: dan54863@mail.ru

**Ходашинский Илья Александрович**

Д-р техн. наук, проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа  
Эл. почта: hodashn@gmail.com



*Секция 21*

**РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА**

*Председатели секции – **Шурыгин Юрий Алексеевич**, директор департамента управления и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д-р техн. наук, профессор;  
**Коцубинский Владислав Петрович**, доцент каф. КСУП, канд. техн. наук*



О.А. Брылев, А.С. Беляев, Е.А. Иванов

## Трудности определения проскальзывания колёс мобильного робота на неоднородной поверхности

Приведено исследование показаний токов двигателей мобильного робота при движении по существенно неоднородной среде. Построены зависимости между током двигателей и коэффициентом сцепления колеса. В ходе исследования было установлено, что на величину проскальзывания влияет не только тип подстилающей поверхности, но и направление движения, встроенные регуляторы и низкий клиренс робота.

**Ключевые слова:** проскальзывание колёс, мобильный робот, неоднородная поверхность.

При функционировании в естественных физических неоднородных условиях, таких как грязь, снег, песок, лёд, трава и т.д., мобильные роботы испытывают множество негативных воздействий, влияющих на их движение. Непосредственное влияние оказывают эффекты проскальзывания и пробуксовки колёс. Данные эффекты вносят существенную ошибку при решении задач локализации, навигации и планировании пути, поскольку определить скорость движения робота в среде по показаниям с энкодеров становится невозможным. Кроме того, в реальных условиях, где подстилающая поверхность может состоять из множества разнородных участков, появляются дополнительные эффекты взаимовлияния разных поверхностей. Такого рода воздействия значительно усложняют систему управления. В большинстве случаев роботу становится необходимо определять не только координаты, но и тип поверхности и алгоритм передвижения по ней. Эффект застревания (погружения) колёс в среду также усложняет процесс управления.

Исходя из этого, для роботов, функционирующих в естественных физических неоднородных условиях, строят модели, позволяющие определить характер и величину внешних воздействий и компенсировать их. Существует несколько основных подходов при построении подобных алгоритмов:

- на основе определения физических величин, таких как коэффициент сцепления;
- на основе нефизических закономерностей, в основном построенных с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

Оба этих подхода могут быть разделены на две категории:

- с использованием классификаторов подстилающей поверхности;
- без использования классификаторов, т.е. построение обобщённой модели движения.

В работах [1-3] при движении робота по песчано-каменистому грунту использовалась физическая зависимость между проскальзыванием колёс и током двигателей. Полученная информация использовалась в системе управления для компенсации проскальзывания, что позволило скорректировать траекторию движения.

В работе [4] при передвижении мобильного робота по неоднородной среде использовался классификатор проходимости сред. Данный классификатор

строился на основе динамической модели робота и информации с сенсорной системы (датчик тока, инерционный датчик, энкодеры и датчики момента). Определение проходимости происходит по оценке сил сопротивления движения и величины проскальзывания колёс.

В работе [5] компенсация проскальзывания при движении робота происходит на основе кинематики мобильной платформы, а компенсация достигается регулятором на основе функции Ляпунова.

В работах [6, 7] построение моделей локализации осуществлялось при помощи нейронных сетей, основанных на методе группового учёта аргументов. В качестве входных параметров использовались данные с гироскопа, акселерометра, токовых датчиков, энкодеров. Данные с моделей использовались для коррекции положения робота при движении по существенно неоднородному полигону. Кроме того, были проведены сравнения работы моделей с учётом предварительной классификации на разные поверхности и без классификации.

Представленные методы показывают достаточную точность определения проскальзывания колёс и подстилающих поверхностей, в условиях, когда размеры поверхностей значительно больше мобильного робота. В условиях, когда размеры поверхностей соизмеримы с роботом [6, 7] в местах перехода с одной поверхности на другую, исследователи сталкиваются с проблемой накопления ошибки алгоритмами.

В данной работе приведён анализ данных, полученных во время перемещения робота по значительно неоднородной поверхности.

### Испытательный полигон и мобильная платформа

Испытательный полигон представляет собой набор из участков разной формы и размеров. Все участки состоят из 2-х слоёв: внутреннего и внешнего. Внутренний отвечает за эффект погружения и бывает 2-х видов: жёсткий – без погружения и мягкий – с погружением. Внешний слой делится на 8 типов, внешне отличающихся рельефом и цветом. В качестве основных типов поверхностей выделим 3 типа, значительно отличающихся своей проходимостью (таблица).

В качестве мобильной платформы используется мобильный робот Festo Robotino (рис. 1). Aruco маркер закреплён сверху на роботе. Данный маркер



используется для определения положения и угловой ориентации робота при помощи системы технического зрения, установленной над полигоном. Внешний вид полигона с роботом приведен на рис. 2.

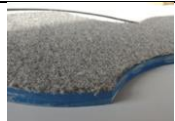


Основные типы поверхностей полигона		
Тип 1	Тип 2	Тип 3
		
Легкопроходимая поверхность без погружения	Среднепроходимая поверхность без погружения	Труднопроходимая поверхность с погружением



Рис. 1. Робот Festo Robotino

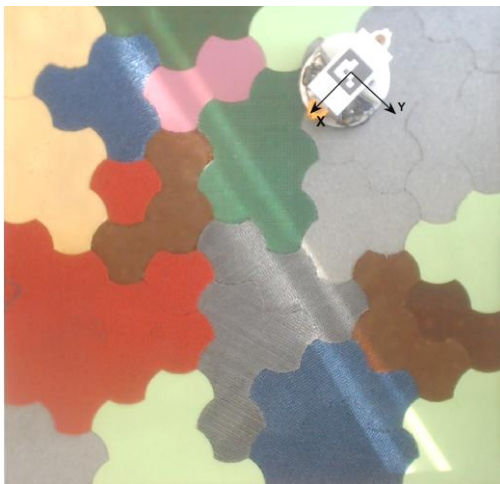


Рис. 2. Испытательный полигон

#### Метод получения и обработки данных

По аналогии с [1] была поставлена задача определения проскальзывания колеса робота по данным с датчиков тока. В качестве коэффициента проскальзывания  $s$  было взято отношение действительной скорости перемещения робота  $\omega_{\text{eff}}$  к скорости  $\omega_{\text{act}}$  с энкодера робота

$$s = \frac{\omega_{\text{eff}}}{\omega_{\text{act}}}. \quad (1)$$

Для определения действительной скорости вращения колеса робота первоначально по системе технического зрения определялось изменение координат и угловой ориентации робота в его локальной системе координат  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \theta$ . Из данных значений

путём кинематических преобразований для трёхколёсной omni-платформы [8] получаем действительные скорости вращения колёс робота  $\omega_{\text{eff}}$ :

$$\begin{pmatrix} \omega_{\text{eff}1} \\ \omega_{\text{eff}2} \\ \omega_{\text{eff}3} \end{pmatrix} = \frac{60 \cdot k_{\text{gear}}}{2\pi \cdot r} \begin{pmatrix} -\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) & R \\ -\sin(\pi) & \cos(\pi) & R \\ -\sin\left(\frac{5\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3}\right) & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{gear}}$  – передаточное число редуктора и ременной передачи мотора (16),  $r$  – радиус колеса робота (40 мм),  $R$  – расстояние от центра робота до колёс (125 мм).

Для получения зависимостей, аналогичных [1], между током двигателей и коэффициентом проскальзывания была проведена серия экспериментов на существенно неоднородном полигоне. В ходе экспериментов были получены значения токов электродвигателей, скорости вращения колёс и скорости движения робота по системе технического зрения. При этом робот двигался по полигону с различными скоростями вдоль осей  $X$  и  $Y$  локальной системы координат робота.

#### Анализ экспериментальных данных

Полученные в процессе экспериментов данные представлены на рис. 3.

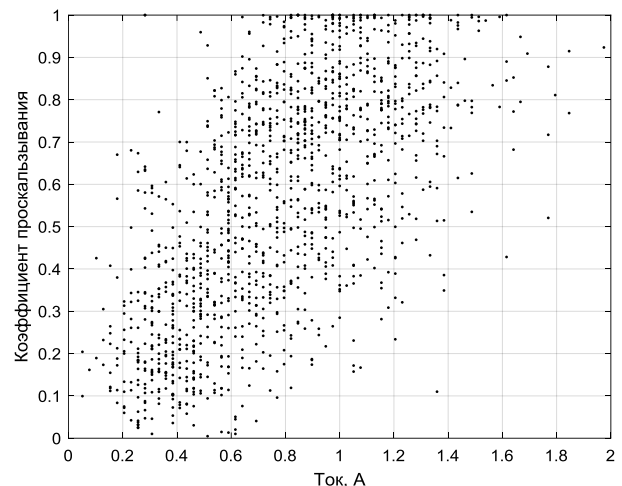


Рис. 3. Экспериментальные данные со всего полигона

Проведя анализ, можно сделать вывод, что по сравнению с данными из [1] данные имеют сильный разброс, что происходит из-за влияния существенно неоднородного полигона. Кроме того, существенное влияние вносят небольшой клиренс робота и кинематика его omni-колёс. Данные эффекты существенно усложняют задачу определения проскальзывания и последующей навигации мобильного робота.

Поскольку одним из основных факторов, влияющих на сложность данной задачи, является именно неоднородный полигон, были проведены аналогичные эксперименты на отдельных типах поверхностей. Полученные данные, представленные на рис. 4, также имеют существенный разброс, в особенности на третьем типе поверхности (труднопроходимая поверхность с эффектом погружения). Однако по ним

можно проследить корреляцию между значениями токов двигателей и типом поверхности, что позволяет получить дополнительную информацию о типе подстилающей поверхности.

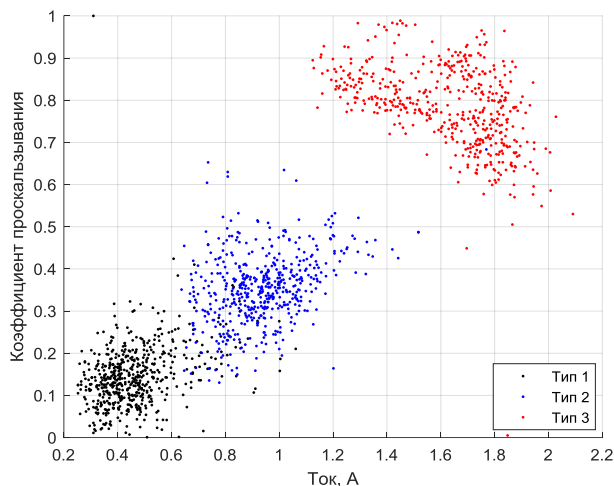


Рис. 4. Экспериментальные данные по типам поверхностей

При движении по существенно неоднородному полигону, когда колёса робота находятся на разных поверхностях, происходит их нелинейное воздействие на значение тока двигателей. В результате этого тока электродвигателей становятся близки по значениям даже на разных по проходимости поверхностях. Поэтому применение данной информации для определения проскальзывания невозможно, поскольку не удаётся адекватно оценить положение и угловую ориентацию робота и как следствие скорректировать их.

Данный эффект может быть связан как непосредственно с условиями, так и с конструкцией робота ввиду встроенных в робота регуляторов тока и скорости двигателя и малого клиренса.

Также необходимо отметить, что на величину тока двигателя влияет не только тип поверхности, но и направление движения робота. Для дополнительного исследования данного эффекта были построены графики на рис. 5–7.

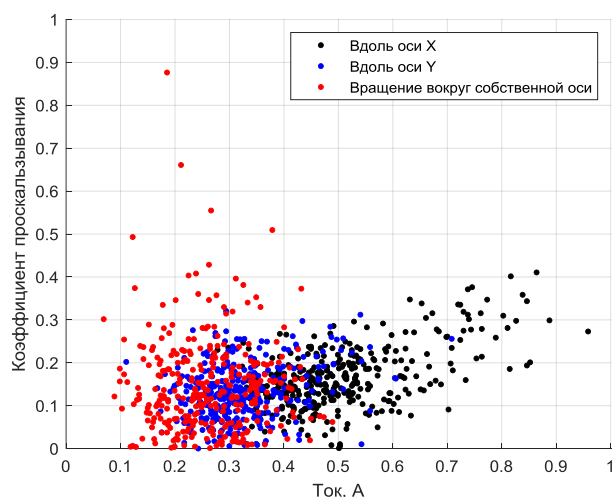


Рис. 5. Распределение данных по типу движения для первого типа поверхности

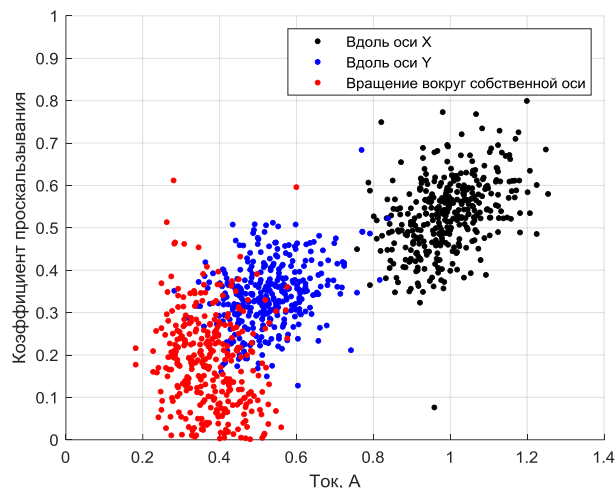


Рис. 6. Распределение данных по типу движения для второго типа поверхности

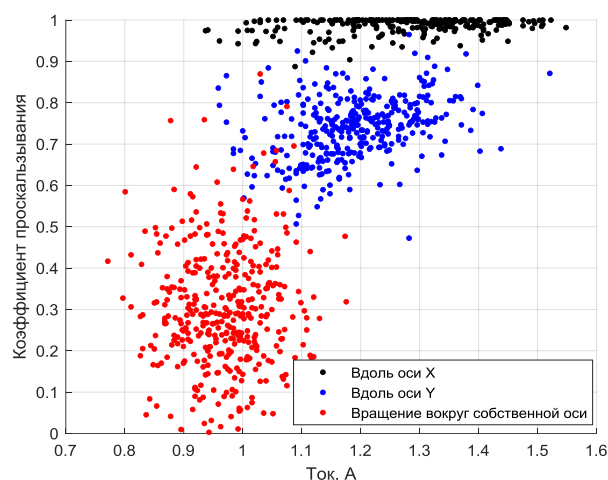


Рис. 7. Распределение данных по типу движения для третьего типа поверхности

На графиках наблюдается сильная взаимосвязь величин проскальзывания и тока с направлением движения робота. Этот эффект сильно усложняет синтез системы компенсации проскальзывания. Его влияние требует более тщательного исследования, которое будет проведено в дальнейшем.

**Заключение**

В ходе исследования было установлено, что на величину проскальзывания влияет не только тип подстилающей поверхности, но и направление движения, кинематика omni-колёс, встроенные регуляторы и низкий клиренс робота. Планируется создать модель, учитывающую данные факторы для определения проскальзывания и синтеза системы управления.

Данное исследование проведено при поддержке Фонда содействия инновациям по контракту № 16053GU/2020 от 24.12.2020.

*Литература*

1. Current-based slippage detection and odometry correction for mobile robots and planetary rovers / L. Ojeda, D. Cruz, G. Reina, J. Borenstein // IEEE Transactions on Robotics. – 2006. – Vol. 22, № 2. – P. 366–378.

2. The FLEXnav precision dead-reckoning system / L. Ojeda, G. Reina, D. Cruz, J. Borenstein // International Journal of Vehicle Autonomous Systems. – 2006. – Vol. 4, № 2-4. – P. 173–195.

3. Ojeda L. Experimental results from FLEXnav: An expert rule-based dead-reckoning system for Mars rovers / L. Ojeda, G. Reina, J. Borenstein // IEEE Aerospace Conference Proceedings. – 2004. – Vol. 2. – P. 816–825.

4. Wheel slippage and sinkage detection for planetary rovers / G. Reina, L. Ojeda, A. Milella, J. Borenstein // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2006. – Vol. 11, № 2. – P. 185–195.

5. Goswami N. Gain tuning of Lyapunov function based controller using pso for mobile robot control / N. Goswami, P. Padhy // 11th International Conference on Industrial and Information Systems. – 2016. – P. 295–299.

6. Andrakhanov A. Navigation learning system for mobile robot in heterogeneous environment: Inductive modeling approach / A. Andrakhanov, A. Belyaev // Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT-2017. – 2017. – Vol. 1. – P. 543–548.

7. Andrakhanov A. GMDH-based learning system for mobile robot navigation in heterogeneous environment / A. Andrakhanov, A. Belyaev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 689. – P. 1–20.

8. Indiveri G. Swedish wheeled omnidirectional mobile robots: Kinematics analysis and control // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, № 1. – P. 164–171.

---

**Брылев Олег Александрович**

Студент магистратуры ОАР ИШИТР НИ ТПУ  
Эл. почта: oab12@tpu.ru

**Беляев Александр Сергеевич**

Ассистент ОАР ИШИТР НИ ТПУ  
Эл. почта: asb22@tpu.ru

**Иванов Егор Андреевич**

Студент магистратуры ОАР ИШИТР НИ ТПУ  
Эл. почта: eai13@tpu.ru

УДК 621.396.41

Е.В. Ланин, В.А. Казанин, А.В. Бадьин, К.В. Дорожкин

## К вопросу о возможности создания автоматизированной системы для измерения диоксида углерода в нижней тропосфере Земли с использованием летающего дрона

Дано определение БПЛА вертолетного типа и проиллюстрирована блок-схема подключения периферийных устройств к полетному контроллеру. Описаны датчик углекислого газа MH-Z19B и основной принцип его работы, также рассмотрена возможность измерений параметров воздуха на борту БПЛА для постоянного мониторинга за изменениями парниковых газов.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, БПЛА, микроконтроллер, диоксид углерода, углекислый газ, водяной пар, метан, парниковый газ.

Точная и количественная оценка парниковых газов критически важна для определения тенденции изменения окружающей среды и дальнейшего прогнозирования потенциальной угрозы для человеческого общества. В самом лучшем случае количественная оценка должна быть быстрой, обеспечивать высокую точность измерений и обладать минимальными затратами.

В парниковых газах с точки зрения вклада выделяют три основных компонента: водяной пар ( $H_2O$ ), метан ( $CH_4$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ). Влияние водяного пара составляет более чем 60% от всего эффекта на нашу планету. Газообразные молекулы воды имеют значительное поглощение земного излучения, что приводит к существенному увеличению положительной обратной связи, но в то же время повышается облачность, которая отражает падающий солнечный свет и снижает дневной перегрев нижних слоев атмосферы.

На диоксид углерода приходится наибольшая доля парникового эффекта, создаваемого деятельностью человека. Выбросы углекислого газа ( $CO_2$ ) проникают в атмосферу по вине человека из трех основных источников: жилых и коммерческих помещений с большой концентрацией людей, выхлопных газов транспортных средств, промышленных предприятий, связанных с переработкой топлива в тепло [1].

Рост концентрации углекислого газа в атмосфере может вызвать вредные явления – повышение температуры на Земле и ухудшение качества воздуха из-за того, что диоксид углерода блокирует передачу геотермальной энергии в атмосферу, что приводит к отражению тепла. Таким образом, сокращение выбросов  $CO_2$  в окружающую среду может снизить данные негативные последствия.

Парниковый эффект от  $CH_4$  в 34 раза сильнее, чем от углекислого газа, в прогнозе на 100 лет, и в 84 раза в перспективе на 20 лет. Разложение метана в атмосфере составляет около 10 лет [2], с ростом антропогенных источников метана газ не успевает естественным образом разлагаться, что приводит к увеличению содержания газа в атмосферном воздухе Земли.  $CH_4$  занимает второе место по эффективному поглощению теплового излучения после диоксида углерода [3].

Проведенный анализ показал, что парниковые газы являются потенциальной угрозой для человечества, и поэтому имеется необходимость в их быстрой количественной оценке. Для этой цели предлагается использовать беспилотно-летательный аппарат (БПЛА) вертолетного типа с четырьмя роторами – квадрокоптер, на борту которого установлены датчики температуры, углекислого газа и влажности.

### Описание БПЛА вертолетного типа и необходимой периферии

Квадрокоптер имеет четыре симметричных несущих винта, приводимых в движение моторами, зафиксированными на концах четырех перпендикулярных лучей рамы (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид квадрокоптера на базе полетного контроллера Pixhawk 2.4.8

На рис. 2 проиллюстрированы основные элементы, входящие в квадрокоптер, для автоматизированного или ручного режима полета.

Самым важным элементом в БПЛА является полетный контроллер, отвечающий за обработку массивов данных, получаемых с датчиков, и посылающий информацию о состоянии системы по протоколу MAVLINK на наземную станцию через телеметрию.

Полетный контроллер можно подключить как напрямую к наземной станции, так и управлять им на расстоянии с использованием телеметрии. Наземная станция позволяет планировать миссию и траекторию полета для БПЛА.

Следующий компонент квадрокоптера – это телеметрия, отвечающая за прием и передачу пакета

данных на полетный контроллер и наземную станцию. Данные, поступающие на наземную станцию, содержат информацию о полете, расстоянии БПЛА от места взлета, режиме полета, качестве GPS-сигнала и т.д.

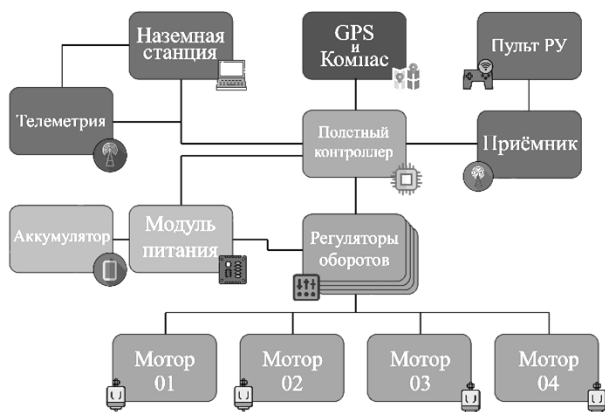


Рис. 2. Блок-схема подключения периферии к полетному контроллеру

Чтобы квадрокоптер совершал автоматизированный полет, нужны телеметрия и GPS-модуль. Обычно в GPS-модуль входит ещё и компас, так как встроенный компас в полетном контроллере Pixhawk 2.4.8 работает нестабильно с увеличением продолжительности полета из-за постоянно хаотичных магнитных полей – наводок, создаваемых из-за максимальной укомплектованности SMD-компонентов. GPS-модуль отвечает за местонахождение БПЛА в пространстве, компас – за направление движения квадрокоптера.

Для ручного управления достаточно моторов с регуляторами оборотов, приемника и пульта радиоуправления (РУ), а также питания всей системы. Приемник радиосигнала работает на частоте 2,4 ГГц, имеет 6 выходных каналов для подключения дополнительной периферии и управления с помощью передатчика РУ.

Моторы с несущими винтами необходимы квадрокоптеру для взлета и дальнейшего полета. К моторам подключаются регуляторы оборотов, управляемые полетным контроллером по протоколу «Oneshot125», которые посылают на обмотки двигателей переменное напряжение с частотой, регулирующей скорость вращения несущих винтов.

Модуль питания предназначен для преобразования напряжения с более высокого на 5 В, чтобы питать полетный контроллер и периферию, а также для обеспечения электроэнергией регуляторов оборотов.

#### Устройство датчика углекислого газа

Описание датчика углекислого газа MH-Z19B (рис. 3).

Датчик содержит два вывода питания Vin и Gnd; аналоговый вывод Vo; PWM-контакт для обмена данными с микроконтроллером (МК), использующий широтно-импульсную модуляцию; Rx и Tx для передачи и приема информации по последовательному порту общего назначения (UART); Hd отвечает за калибровку нулевого значения углекислого газа прикладываемом напряжении низкого уровня в течение 7 с.

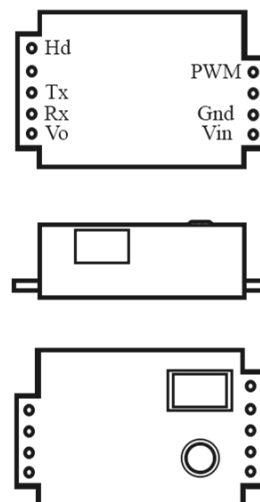


Рис. 3. Внешний вид датчика углекислого газа

Также некоторые чипы имеют проблемы с работой по PWM, поэтому лучшим вариантом остается порт UART, так как подключение по нему снижает нагрузку на МК и к тому же позволяет использовать команды калибровки.

Датчик имеет небольшие габаритные размеры, основан на принципе недисперсионного инфракрасного излучения (NDIR) для обнаружения наличия CO<sub>2</sub> в воздухе. Внутри датчика две камеры: одна содержит азот и является камерой с отправной точкой, а вторая наполняется исследуемым воздухом. В процессе газ во второй камере сравнивается с результатами первой камеры и посылается световой импульс, проходящий через две камеры, который рассеивается на молекулах газа. Этот свет анализируется фотоприемником, на основании чего вычисляется концентрация искомого газа.

Этот датчик обладает хорошей селективностью, низким энергопотреблением, точностью и широким диапазоном измерений и к тому же содержит встроенную температурную компенсацию. Цикл автоматической калибровки выполняется каждые 24 часа.

Средний срок службы датчика составляет десять лет и зависит от загрязнения пылью фильтров, состояния фотоприемника и изменения спектральных составляющих.

#### Описание работы системы

Для объединения датчика углекислого газа MH-Z19B с БПЛА была разработана система на базе микроконтроллера ATmega328P, отвечающего за обработку данных. Часы DS3231 используются для присвоения времени получаемым результатам. Карта памяти необходима для хранения результатов измерений концентрации углекислого газа в воздухе (рис. 4).

Питание системы обеспечивает аккумулятор квадрокоптера. Микроконтроллер подключается к БПЛА через оптрон для гальванической развязки в целях обеспечения безопасности как БПЛА, так и микроконтроллера.

В полетный контроллер БПЛА необходимо загрузить миссию с наземной станции, которая включает в себя следующие команды: взлет, полет до

точки проведения измерений, включение системы измерений, ожидание окончания измерений и полет до следующей точки. Последней командой у БПЛА является возврат на исходную позицию по GPS-данным для обработки полученных данных.

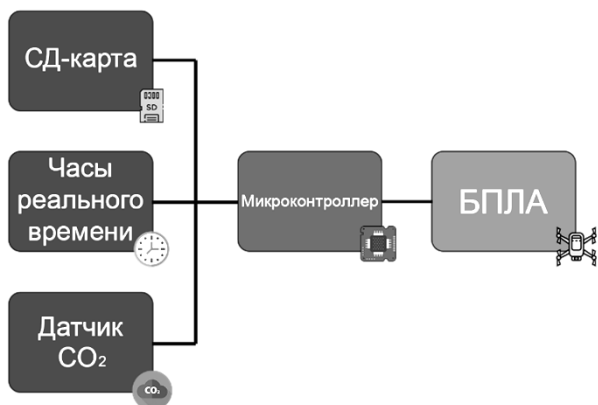


Рис. 4. Структурная схема системы

### Заключение

В приведенной статье дано определение БПЛА вертолетного типа и проиллюстрирована блок-схема подключения периферийных устройств к полетному контроллеру. Описаны датчик углекислого газа МН-Z19В и основной принцип его работы, также рассмотрена возможность измерений параметров воздуха на борту БПЛА для постоянного мониторинга за изменениями парниковых газов.

### Литература

1. Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth / Lo.E. Mitchell, J.C. Lina, D.R. Bowling, D.E. Pataki, C. Strong, A.J. Schauer, R. Bares, S.E. Bush, B.B. Stephens, D. Mendoza, D. Mallia, L. Holland, K.R. Gurney, J.R. Ehleringer // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2003. – No. 115(12). – P. 2912–2917.
2. Почему у российского газа нет экологичной альтернативы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.bbc.com/russian/blogs/2014/05/140512\\_blog\\_esirov\\_russian\\_gas](https://www.bbc.com/russian/blogs/2014/05/140512_blog_esirov_russian_gas), свободный (дата обращения: 15.09.2021).
3. Улыбаев Т.С. Роль метана в парниковом эффекте / Т.С. Улыбаев, М.П. Коротаев, И.В. Аратмонова // Природообустройство. – 2009. – № 1. – С. 44–49.

### Ланин Евгений Владимирович

Студент каф. радиоэлектроники (КРЭ) НИ ТГУ  
Эл. почта: zenkalanin@gmail.com

### Казанин Владислав Александрович

Студент КРЭ НИ ТГУ  
Эл. почта: kazanin\_2013@mail.ru

### Бадьин Александр Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, доцент КРЭ НИ ТГУ  
Эл. почта: thzlab@mail.ru

### Дорожкин Кирилл Валерьевич

Ассистент КРЭ НИ ТГУ  
Эл. почта: yasbtk@yandex.ru

А.С. Беляев, Д.В. Майтаева, А.А. Филипас

## Сравнение активной опорной и 4-тросовой систем обезвешивания на примере односекционной солнечной батареи

Наземные испытания остаются неотъемлемой частью процесса разработки космических аппаратов, важная роль в которых отводится системам обезвешивания, компенсирующим вес элементов космических аппаратов. В данной работе рассмотрены используемые системы обезвешивания и проведено сравнение 2-новых типов систем обезвешивания: активной опорной и 4-тросовой системы. Приведены структурные схемы данных систем обезвешивания, содержащих систему управления на основе 3-контурного ПИД-регулятора. Проведен анализ работы и выявлены недостатки данных систем по полученным в ходе моделирования переходным характеристикам.

**Ключевые слова:** обезвешивание, солнечные батареи, синтез системы управления, наземные испытания, космические аппараты.

В современном мире с постоянным развитием космических технологий необходимо проводить испытания новых разработок в земных условиях для экономической эффективности проектов и исключения большого количества отказов оборудования на орбите. В силу ограниченности допускаемых размеров космических аппаратов, отправляемых в космос, применяется складной тип конструкций, которые впоследствии раскрываются на орбите. Для проверки работоспособности аппаратов в наземных условиях применяются системы обезвешивания (СО), которые позволяют компенсировать силу тяжести, действующую на конструкцию, и приблизить условия эксперимента к условиям космоса. В настоящий момент известны тросовый кареточный, опорный и многотросовый типы обезвешивания объектов.

На сегодняшний момент большее распространение получили тросовые системы обезвешивания, использующие передвигающиеся за обезвешиваемым элементом по рельсам каретки [1]. Для работы системы обезвешивания данного типа на потолке помещения (или на отдельной опоре) закреплена рейка, по которой передвигается каретка, создание силы обезвешивания происходит с использованием механических конструкций (пружин или противовесов) или за счет электродвигателей. Для непосредственного перемещения каретки по рельсу также могут использоваться электроприводы, которые компенсируют «эффект присоединенных масс», имеющийся в пассивных системах обезвешивания.

Примером подобных является приведенная на рис. 1 пассивная система обезвешивания [2], где 1 – секционные штанги, 2 – транспортировочное кольцо, 3 – космический аппарат. Секции 4-секционных штанг 1 расположены над соответствующими секциями 5-секционных складных панелей солнечных батарей 6. Потолок помещения – 8, несущие пилоны, закрепленные к потолку, – 9. Техническая подставка обозначена 15.

Наиболее точными системами подобного типа являются полностью активные системы обезвешивания, использующие электроприводы как для самостоятельного перемещения кареток, так и для создания силы обезвешивания. Однако данные электропри-

воды значительно увеличивают массогабаритные параметры системы, а установка их на передвигаемые каретки значительно увеличивает инерционность системы обезвешивания, что в результате сказывается при монтаже и наладки системы и может привести к неправильной работе системы обезвешивания.

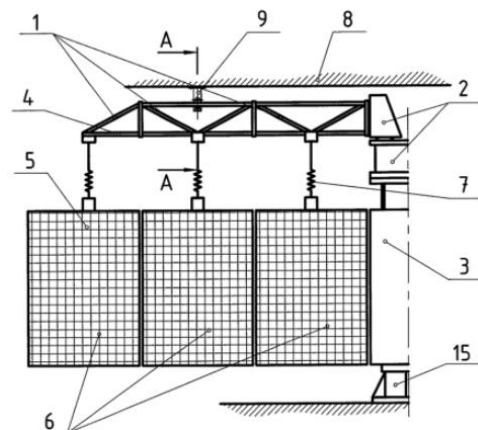


Рис. 1. Общий вид устройства в рабочем положении

Для опорного обезвешивания применяются колесные и роликовые опоры [3]. Основным преимуществом данного типа является простота конструкции, поскольку для передвижения такой платформы не требуется дополнительных конструкций, а все элементы системы можно сосредоточить на мобильной платформе. Концепция использования мобильного робота как активной опорной системы обезвешивания представлена в [4, 5] и позволяет также компенсировать нежелательный эффект присоединенных масс и недостатки тросовых систем управления.

Системы обезвешивания, использующие несколько тросов, не менее 3, имеют преимущества перед тросовыми системами кареточного типа за счет того, что не имеют больших перемещаемых масс, а создание силы обезвешивания и движение за элементом происходит за счет изменения длин и сил натяжения тросов. Состоят такие системы из привода с лебедкой, на который намотан трос, закрепленный к обезвешиваемому объекту. Недостатком такой системы является ее сильная нелинейность, что значительно усложняет процесс синтеза системы управле-

ния. Данные системы получили широкое распространение в медицине, где показали необходимое качество работы для компенсации веса пациентов [6–8], что говорит о возможности их применения для обезвешивания элементов космических аппаратов.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что активные опорные и многотросовые системы имеют преимущества по сравнению с активными системами обезвешивания кареточного типа, поскольку не имеют больших перемещаемых масс, что должно уменьшить время наладки данных систем и облегчить работу с данными системами. Однако поскольку неизвестно какой из 2 данных типов систем лучше справится с задачей обезвешивания, в данной работе ставится задача сравнения эффективности работы данных типов систем обезвешивания.

### Основная часть

В качестве обезвешиваемого объекта была выбрана односекционная солнечная батарея. Конструкция состоит из балки 2, обозначенной на рис. 2, которая закреплена к корпусу космического аппарата 1, и солнечной панели 3. Обезвешиваемый объект имеет две вращательные вокруг оси Z 4, 5 и одну вращательную вокруг оси X степень свободы 6, представленные на рис. 2.

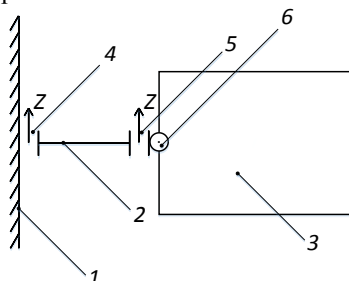


Рис. 2. Кинематическая схема солнечной батареи

Для определения изменения положения солнечной батареи в пространстве используется датчик определения угла отклонения обезвешиваемого объекта, а для определения веса обезвешиваемого элемента – датчик силы.

Для создания имитационной модели и исследования процессов, протекающих в системах, были использованы блоки библиотеки Simscape Multibody пакета прикладных программ Matlab Simulink. Полученный внешний вид имитационной модели представлен на рис. 3.

### Описание синтеза системы управления

Система управления обоими видами систем обезвешивания были реализованы на базе 3 контуров с ПИД-регуляторами и представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Модель опорной системы обезвешивания и системы управления [9] состоит из моделей двигателей постоянного тока, модели системы обезвешивания, прямой и обратной кинематики, модели обезвешиваемого элемента и 3-контурной системы управления. Первый контур осуществляет стабилизацию скорости вращения двигателями, второй контур стабилизирует скорость движения платформы, главный контур осуществляет управление по углу отклонения опорной стойки.

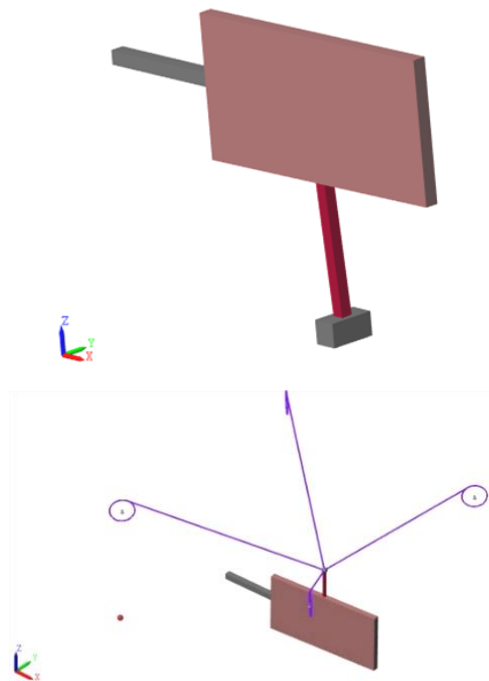


Рис. 3. Внешний вид имитационной модели СО тросового типа

### Анализ работы систем обезвешивания

Тестирование работы систем обезвешивания проводилось в следующем режиме: в начальный момент времени солнечная панель под действием силы тяжести работы имеет угол прогиба, с 0 по 5 с система обезвешивания должна позиционироваться и обезвесить вес солнечной панели, в момент времени 5 с начинается раскрытие солнечной панели, зачековка положения панелей происходит при достижении заданного положения раскрытия примерно в момент времени 8 с. Единственным отличием в процессе работы является то, что в начальный момент времени (с 0 по 1 с) опорная система обезвешивания сначала подъезжает под обезвешиваемый элемент, а после начинает процесс компенсации веса, а тросовая система совмещает данные процессы. Данный факт связан с тем, что у опорной системы обезвешивания контуры позиционирования и компенсации веса развязаны, а у многотросовой системы зависимы. В результате моделирования получены следующие переходные характеристики, представленные на рис. 6–8.

По данным переходным характеристикам видно, что система опорного обезвешивания имеет меньшую ошибку по углу прогиба, что говорит о лучшем качестве обезвешивания, однако данная система хуже справляется с углами отклонения по осям X и Y в процессе раскрытия и после зачековки солнечной панели. Данная проблема связана с тем, что конструкция опорной системы обезвешивания построена на принципе 2-степенного перевернутого маятника, которая является неустойчивой и неминимально фазовой системой, из-за чего ПИД-регулятор не является лучшим решением для управления подобным объектом. Данный недостаток можно исправить при использовании оптимальных регуляторов, таких как LQR или LQG.



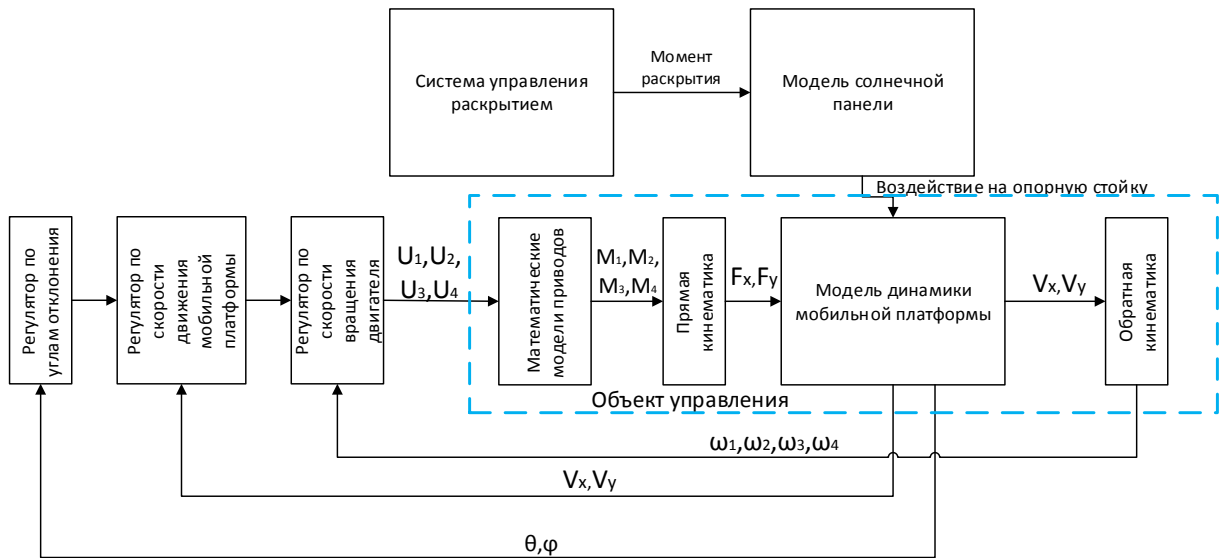


Рис. 4. Структурная схема системы управления опорной системой обезвешивания

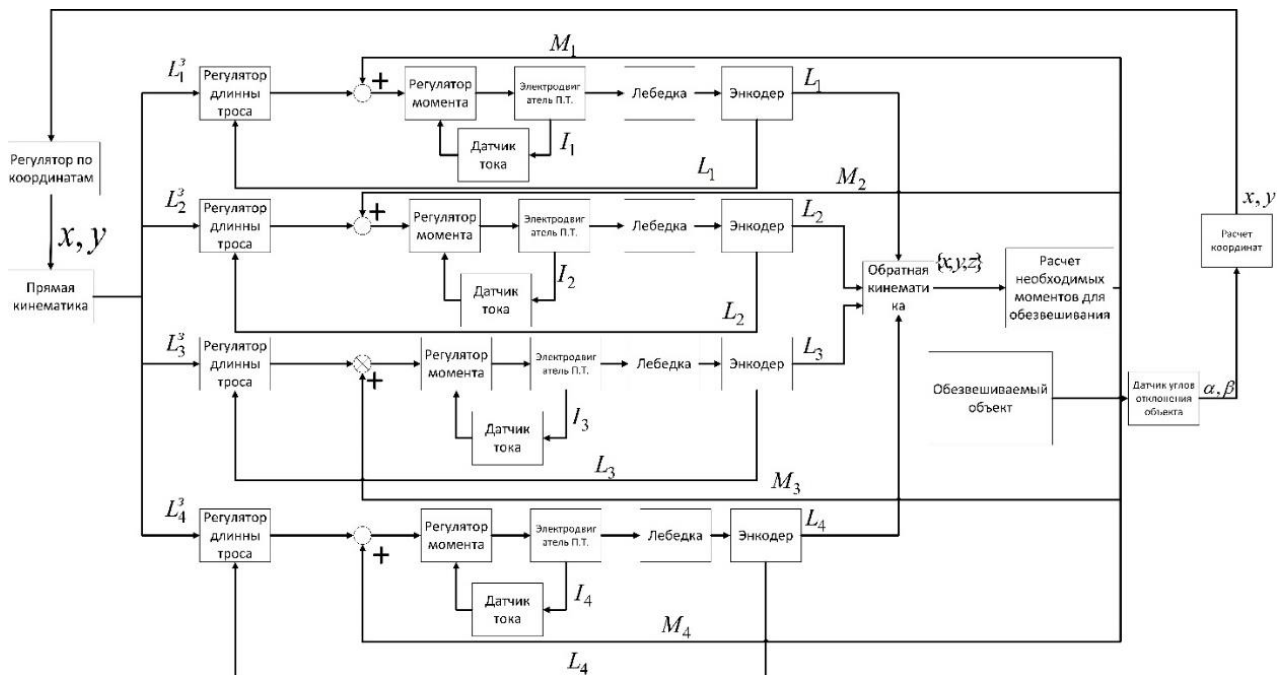


Рис. 5. Структурная схема тросовой СО

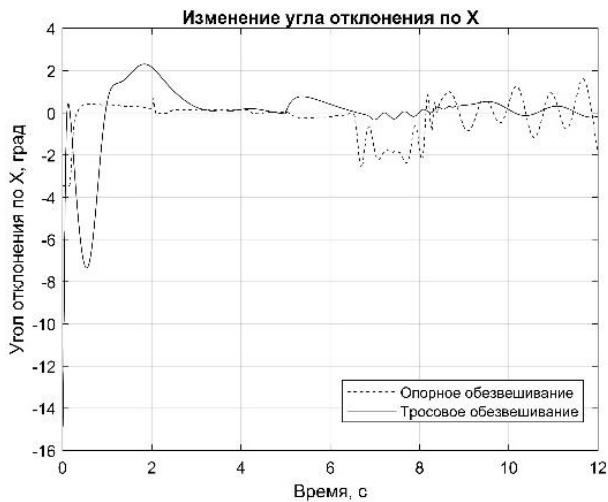


Рис. 6. Переходные характеристики по углу отклонения по X

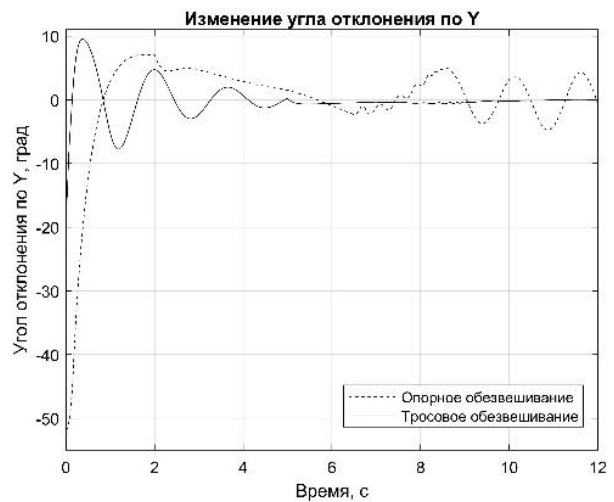


Рис. 7. Переходные характеристики по углу отклонения по Y

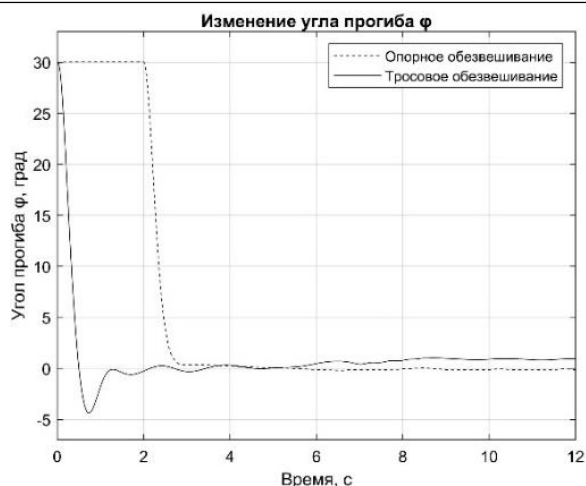


Рис. 8. Переходные характеристики по углу прогиба

### Заключение

В данной работе проведено сравнение активной опорной системы обезвешивания на базе мобильной робототехнической платформы и 4-тросовой системы обезвешивания для компенсации веса односекционной солнечной панели.

### Литература

1. Tang X. An overview of the development for cable-driven parallel manipulator // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. – Т. 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2014/823028>, свободный (дата обращения: 1.06.2021).
2. Пат. 2 299 840 РФ, МПК В64G 7/00, В64G 5/00, G01M 13/00, G01M 17/00. Устройство для обезвешивания секционных складных панелей солнечных батарей космического аппарата / В.А. Вохмин (РФ). – № 2005129404/11; заявл. 20.09.05; опубл. 27.05.07, Бюл. № 15. – 10 с.
3. Kremer K. MAVEN Takes Final Test Spins, Flexes Solar Panels Before Imminent Trek to Florida Launch Site. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.universetoday.com/103858/maven-takes-final-test-spinsflexes-solar-panels-before-imminent-trek-to-florida-launch-site/>, свободный (дата обращения: 13.09.2020).

4. Малышенко А.М., Беляев А.С. Оценка реализуемости обезвешивания крыльев солнечных батарей при их наземных испытаниях с помощью робокаров // Матер. XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – 2019. – С. 383–385.

5. Имитационная модель системы опорного обезвешивания элементов космических аппаратов / А.С. Беляев, А.А. Филипас, А.В. Тырышкин // Матер. XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – 2020. – С. 60–62.

6. Frey M., Colombo G. A Novel Mechatronic Body Weight Support System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1703563>, свободный (дата обращения: 13.09.2020).

7. The Float [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://reha-stim.com/thefloat\\_2/](https://reha-stim.com/thefloat_2/), свободный (дата обращения: 13.09.2020).

8. Ryzen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.motekmedical.com/solution/ryzen/>, свободный (дата обращения: 13.09.2020).

9. Разработка модели и системы управления мобильным роботом для обезвешивания солнечных панелей / А.С. Беляев, А.М. Малышенко, А.А. Филипас, О.Ю. Суменков // Изв. Тульского гос. ун-та. – Сер.: Технические науки. – 2020. – Вып. 12. – С. 3–11.

---

### Беляев Александр Сергеевич

Ассистент отд. автоматизации и робототехники НИ ТПУ  
Эл. почта: asb22@tpu.ru.

### Майтаева Долсона Валерьяновна

Ассистент отд. автоматизации и робототехники НИ ТПУ  
Эл. почта: dvm43@tpu.ru.

### Филипас Александр Александрович

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф.,  
рук. отд. автоматизации и робототехники НИ ТПУ  
Эл. почта: filipas@tpu.ru

**В.В. Желонкин, И.Д. Шабалин, Е.С. Польшинцев, Е.С. Шандаров**

## Разработка модуля-сопряжения нейрокомпьютерного интерфейса для управления мобильными роботами

Описаны методы, примененные в разработке устройства для сопряжения нейрокомпьютерного интерфейса с различными робототехническими платформами для последующего получения доступа к их управлению.

**Ключевые слова:** робототехника, нейрокомпьютерный интерфейс, устройство ввода, человеко-машинное взаимодействие.

Нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ) – перспективное устройство ввода информации, способное преобразовывать электрические сигналы клеток головного мозга в управляющий сигнал. Принципы работы НКИ основаны на снятии электроэнцефалограммы (ЭЭГ) оператора. Компьютер обрабатывает сигналы ЭЭГ оператора в настоящий момент времени и производит сравнение с набором предварительно записанными и обработанными состояниями. В результате приемник получает управляющий сигнал для переключения работы различных функций.

Образовательные учреждения РФ активно используют робототехническое оборудование разных типов для изучения робототехники. Также в последнее время школы активно покупают нейронные интерфейсы для использования в том числе в проектной деятельности. Представляется интересной задача управления робототехническими комплексами с помощью НКИ [1, 2]. Тем не менее на сегодня нет стандартных средств сопряжения НКИ и популярных комплектов образовательной робототехники [3, 4].

Основной целью новой разработки является создание устройства для сопряжения НКИ с образовательными робототехническими платформами. Данное устройство, выступая в качестве посредника, должно обеспечивать подключение и управление робототехническими платформами, используемыми для образовательных целей в учебных учреждениях.

### Реализация. Аппаратное обеспечение

Основываясь на списке элементов, необходимых для соединения НКИ и робота, и их характеристик, были определены интерфейсы для сопряжения элементов в единую систему.

Список элементов, входящих в архитектуру:

- модуль НКИ;
- станция распознавания;
- модуль сопряжения;
- платформы образовательной робототехники.

В качестве модуля НКИ в данной работе использовалась 8-канальная нейрогарнитура беспроводной регистрации ЭЭГ данных человека на сухих (безгелевых) активных электродах – NeuroPlay 8Cap (рис. 1).

Данный модуль является продуктом российской компании ООО «Нейроботикс». NeuroPlay 8Cap может обрабатывать до 8 различных состояний сознания. Подключение к станции распознавания происходит через Bluetooth 4.0.

### Станция обработки

В роли станции распознавания выступает ПК с установленным ПО Cortex.

Устройство приема управляющих сигналов:

- платформы Lego Mindstorms NXT/EV3,
- семейство микроконтроллеров Arduino,
- человекоподобный робот NAO.



Рис. 1. NeuroPlay 8Cap

Робот NAO (рис. 2) – продукт французской компании SoftBank Robotics. В образовательной сфере в основном используется как робот-помощник или робот-консультант [5, 6].



Рис. 2. Робот NAO

### Архитектура аппаратно-программного комплекса

Архитектура аппаратно-программного взаимодействия разделяется на две рабочие зоны – рабочая зона оператора и рабочая зона робота (рис. 3).

В рабочей зоне оператора располагается станция распознавания в виде ПК с предустановленным набором программ и непосредственно самого оператора. К оператору подключается модуль НКИ, который с помощью электродов снимает показания ЭЭГ. Получаемые ЭЭГ передаются по беспроводной связи Bluetooth от НКИ к ПК. Сырые данные ЭЭГ преобразуются с помощью ПО Cortex. На выходе Cortex выдает определенный номер команды (соответствующей полученному набору ЭЭГ) для управления мобильным роботом.

Далее команды направляются веб-серверу для последующей передачи модулю сопряжения по беспроводной сети путем протокола TCP / IP. Также следует отметить, что для лучшего контроля определенных состояний сознания на станции распознавания воспроизводятся аудиовизуальные стимулы [7]. Данные стимулы способны вызывать у оператора конкретные эмоции, привязанные к определенным командам для управления роботом.

В рабочей зоне находятся модуль сопряжения и выбранная оператором для управления робототехни-

ческая платформа. Модуль сопряжения подключается к сети Wi-Fi для удаленного подключения к станции распознавания и получения команд. Модуль получает команды, обрабатывает и отправляет роботу по специфицированному интерфейсу. Для роботов специфицированы следующие интерфейсы: для Nao – HTTP; для Lego Mindstorms – Bluetooth; для Arduino – UART. Для стабильного подключения рекомендуется располагать модуль сопряжения в непосредственной близости с роботом.

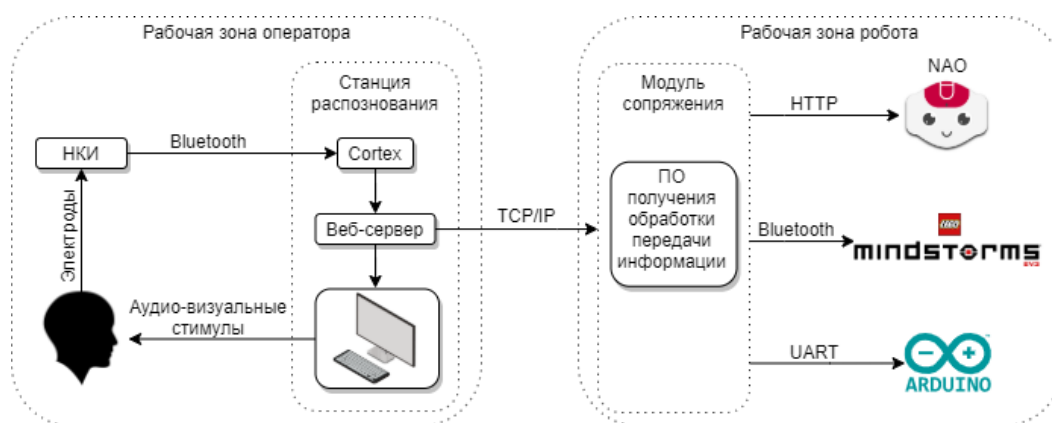


Рис. 3. Разработанная архитектура

### Модуль сопряжения

Модуль сопряжения был разработан на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 3 Model B (рис. 4).

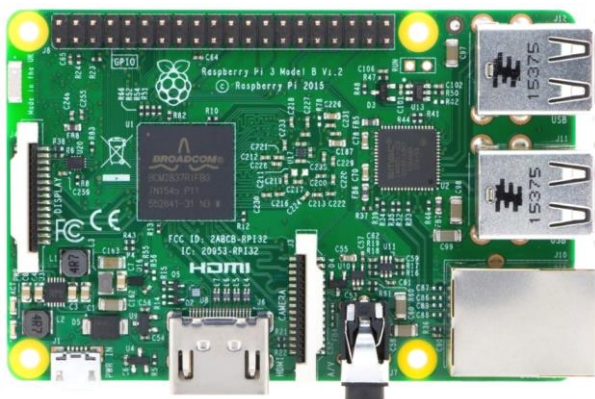


Рис. 4. Raspberry Pi 3 Model B

Результатом разработанного модуля является расширение платы Raspberry Pi, оснащения микрокомпьютера Li-Po аккумулятором, платой для зарядки устройства через micro-USB, переключателями управления питания и выходами для интерфейсов I2C, SPI, USB и Ethernet. Модуль размещен в пластиковый корпус (рис. 5) распечатанный на 3D-принтере по технологии PLA.

Технические характеристики устройства:

- размер: 110×75×45 мм;
- ёмкость аккумулятора: 3500 мАч;
- время работы без подзарядки: 1 ч;
- интерфейсы: USB 2.0, UART, Ethernet, I2C;
- масса: 207 г.



Рис. 5. Экспериментальный образец модуля сопряжения

### Веб-интерфейс

Для успешного опыта взаимодействия пользователя с НКИ, как правило, применяются стимуляции состояний сознания. Наиболее популярные методы стимуляции заключаются в помещении оператора в окружение с аудиовизуальной средой. Данная среда должна помогать пользователю фиксировать конкретное эмоциональное состояние для записи и воспроизведения необходимого состояния сознания.

В рамках данной разработки стимуляция пользователя производится через веб-интерфейс, на котором демонстрируются изображения с целью вызвать у оператора то или иное эмоциональное состояние. На рис. 6 продемонстрирован вариант веб-интерфейса для взаимодействия с роботом NAO. Данный вариант предлагает управление перемещением робота с помощью 4 базовых команд. К каждой команде привязана картинка, рассчитанная на стимуляцию вызова у оператора определенного состояния сознания.

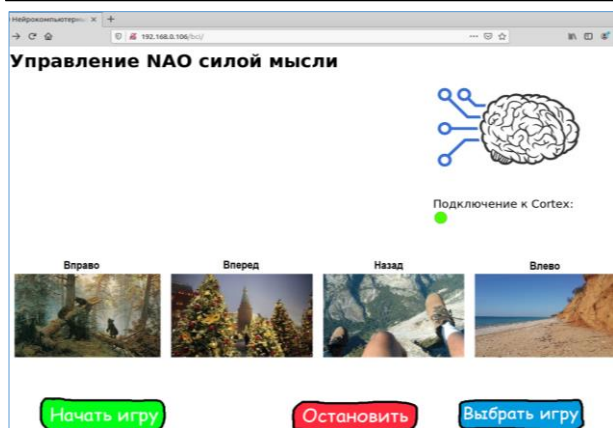


Рис. 6. Веб-интерфейс для управления роботом NAO через НКИ

### Испытания

Испытания проводились в лабораторных условиях. В качестве операторов выступали три сотрудника лаборатории. В условиях малой выборки испытуемых выявлены следующие критерии для работы с НКИ:

- Из трех операторов, только двое смогли добиться стабильной фиксации 4 различных состояний сознания.
- Для использования пользователем больше 3 состояний сознания (следовательно, более 3 управляющих команд) необходимы дополнительные тренировки концентрации внимания.
- Время, необходимое для переключения концентрации оператора между различными состояниями: 2–5 с.
- Задержка в передаче сигнала от НКИ к управляемому устройству (0,5–1 с).

Исходя из приведенных выше результатов, можно сделать вывод что возможность и скорость работы с НКИ является персональной для каждого оператора. Для каждого оператора существует персональный критерий умения концентрировать внимание. Также существенный вклад вносит корректный подбор персональных аудиовизуальных стимулов.

Пример считываемых сигналов ЭЭГ показан на рис. 7.

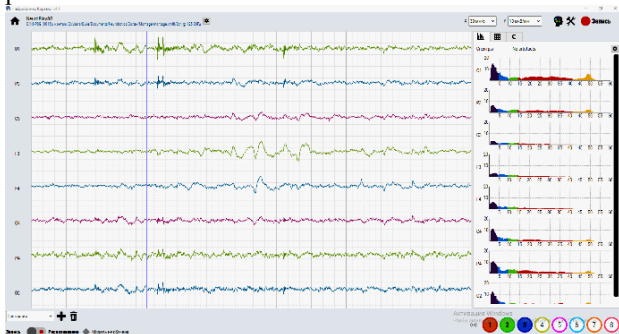


Рис. 7. Интерфейс ПО Cortex

### Заключение

В результате разработки было спроектировано и создано устройство, позволяющее применять модули НКИ для управления робототехническими платформами, такими как Arduino, Lego Mindstorms и NAO. Данный модуль предусмотрен как образовательная модель использования НКИ совместно с образовательными робототехническими платформами.

Можно выделить примеры практического применения устройства:

- управление перемещением мобильного робота с помощью НКИ;
- управление устройствами со встраиваемыми системами на базе Arduino с помощью НКИ;
- управление сценариями и другие взаимодействия с роботом NAO.

### Литература

1. Медведев Д.А. Через 10 лет количество профессий, которых сейчас не существует [Электронный ресурс]. – <https://worldskills.ru/media-czentr/novosti/dmutrui-medvedev-cherез-10-let-koluchestvo-professui-kotorih-seichas-ne-syshestvyet-ydvoutsya-ulu-ytroutsya.html> (дата обращения: 17.11.2020).
2. Levine S.P. et. al. A direct brain interface based on event-related potentials // IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering. – 2000. – Vol. 8, No. 2. – P. 180–185.
3. Богачёва Р.А. Нейропилотирование в образовательной робототехнике: теория и практика // Гуманитарная информатика. – 2016. – № 11. – С. 34–42.
4. Фоменков С.А. и др. Управление мобильным роботом посредством сигналов головного мозга // Молодой ученый. – 2015. – № 17. – С. 280–284.
5. Климов А.А. и др. Система управления приложениями для социального робота // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2019. – № 1-2. – С. 108–110.
6. Желонкин В.В. и др. Использование нейрокомпьютерного интерфейса и социального робота в образовании // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – Т. 1. – С. 306–312, 220.

**Желонкин Владимир Владиславович**  
Студент каф. ФЭ ТУСУР)  
Эл. почта: vladimirposelencev@gmail.com

**Шабалин Илья Дмитриевич**  
Студент каф. ЭП ТУСУРА  
Эл. почта: shabalin\_ilya\_omu@mail.ru

**Полынец Егор Сергеевич**  
Аспирант каф. полупроводниковой электроники НИ ТГУ  
Эл. почта: egoleo@mail.ru

**Шандаров Евгений Станиславович**  
Зав. лаб. робототехники и искусственного интеллекта,  
ст. преп. каф. ЭП ТУСУРА  
Эл. почта: evgenyshandarov@gmail.com

*Секция 24*

**RESULTS OF POSTGRADUATE AND MASTER STUDENTS' RESEARCH  
IN THE SPHERE OF ELECTRONICS AND CONTROL SYSTEMS**

*Председатели секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, канд. филос. наук;  
Соболевская Ольга Владимировна, ст. преп. каф. ИЯ,  
Шнит Елена Ирисметовна, ст. преп. каф. ИЯ*



V.N. Davydov, O.F. Zadorozhny

## Calculation of serial-parallel equivalent circuit elements of a heterostructure with quantum wells

The authors propose a method for calculating the equivalent circuit main parameters. The method is describing the processes of capture and transfer of charge carriers in a semiconductor heterostructure with quantum wells. For the calculation, a simplified physical model of the p-n junction was used, which assumes that the quantum wells thicknesses are much less than the thickness of the barrier layers. The expression computes the parameters for the substitution circuit elements by determining resistive impedance measurements taking into account the number of quantum wells.

**Keywords:** resistive profiling, capacitive profiling, quantum wells, heterostructures.

One of the various methods for analyzing heterostructures with multiple quantum wells (QWs) is the method of an equivalent substitution circuit, which is implemented by means of representing the heterostructure in the form of an RC circuit. The advantage of the method is that instead of considering complex physical processes describing the flow of electrons in a semiconductor, the equivalent parameter of the RC circuit is introduced, and then the flow of current through these elements is considered, which is much easier and allows the analysis of complex processes, without the use of expensive equipment. This method has already been used to study the properties of heterostructures «metal – insulator – semiconductor» in [1, 2].

The purpose of this work is to propose a ready-made solution for determining the resistive and capacitive resistance of an equivalent circuit based on the certain physical model to calculate the parameters of the elements of an equivalent circuit (EC) heterostructure with a QW, which describes the main processes occurring in a semiconductor: the injection of free charge carriers into a QW (the process of capture – charge agents), and the flow of the through current through the heterostructure (the process of charge carriers transfer).

### Simplification in calculation

To calculate the EC resistances and capacitances, a simplified physical model of a p-n-junction with a quantum well was used, which assumes that:

- the thickness of the QWs is much less than the thickness of the barrier layers;
- the total accumulated charge in the QW is small so the distortion of the distribution of electricity of the chemical field in the p-n junction and the charge accumulated in the QW can be disregarded;
- the double-charged layers appearing on the interfaces are ignored.

The calculation of EC differential resistances is conducted using the model of bimolecular recombination by drawing up an expression for the rate of change in the concentration of electrons (holes) as a result of their interaction with each other or with phonons. Differentiation of the obtained expression by voltage gives an analytical representation of the resistance provided to the course of a particular current transfer process.

### QW radiation resistance

The rate of change in the number of electrons (holes)  $n_l$  recombined in the QW can be found from the expression

$$\frac{dn_{rad}}{dt} = B_l n_{qw} p_{qw} = B_l N_{2D}^{(n)}(E) f_n(E) N_{2D}^{(p)}(E) f_p(E). \quad (1)$$

where  $n_{qw}, p_{qw}$  are the concentrations of electrons and holes in the QW at the level of size quantization;  $N_{2D}^{(n)}(E), N_{2D}^{(p)}(E)$  are coefficients of bimolecular radiative recombination;  $f_n(E), f_p(E)$  are the Fermi functions for electrons and holes. Then the expression for the differential resistance of the rectangular QW radiation takes the form (2) (the symbol «q» is the electron charge):

$$R_{em} = \frac{1}{(dj_{em}/dV)} = \frac{\eta_{in} \eta_{ext} \hbar \omega}{q} \cdot \frac{\mu^{(n,p)} \cdot L}{d(V \cdot P_{em})/dV} S. \quad (2)$$

### Capture resistance from QW carriers

Given that the generally accepted model of a QW capture is still unknown [1, 2], we use the Shockley – Read – Hall model for the capture of charge carriers to a deep level to describe the process of transfer and recombination charges. Only then the capture is carried out at the level of dimensional quantization in the QW, the speed of which is described by the probability of capture  $c_{cap}^{(n)}$ . In the specified model, this is an experimentally measured value. According to the model of bimolecular recombination, the capture of a charge carrier is considered as a result of its collision with a lattice defect. This is a kind of virtual particle with the energy of the dimensional quantization level in the QW. As a result of the collision, the electron loses excess energy  $\Delta E_{cap} = E_C^{(b)} - E_k$ , which is produced by a phonon [1, 2]. The electron remains with an energy equal to the energy level in the QW –  $E_k$ . Then the expression for the rate of capture of electrons by the well with the coordinate  $z_t$  is

$$\frac{dn_{cap}}{dt} = c_{cap}^{(n)} \cdot n_{dif}(E, z_t) \cdot N_{2D}^{(n)}(E) \cdot (1 - f_n(E)),$$

where  $n_{dif}(E, z_t)$  is concentration in the barrier layer of electrons that have reached the considered QW. The



emission of a part of the captured electrons back into the barrier layer is included in the through current  $n-j_{thr}$ , which is the sum of the currents of the emitted electrons and electrons flying through the  $p-n$ -junction without interacting with the wells.

#### Calculation of ES capacities

At a high frequency, the capacitance of the heterostructure is determined by the expression

$$C_{hs}^{-1}(V) = \frac{1}{C_{pn}(V)} + \sum_{k=1}^m \left( \frac{1}{C_{qw}^{(k)}(V)} \right),$$

in which the expression for finding the capacity of the  $p-n$  junction is known. The capacitance  $C_{qw}^{(k)}$  in the second term is the capacitance of the series-connected capacitance of the QW  $C_{qw}(V)$  and the capacitance of the process of trapping charge carriers is  $C_{cap}(V)$ . We receive analytical expressions describing these capacities.

#### Quantum well capacity

The charge accumulated by the QW can be found as follows:

$$Q_{qw}(V) = qn_{qw} = qN_{2D}^{(n)} \cdot f_n(E_k, V).$$

From here we find the differential capacity of the QW

$$C_{qw}^{(n)}(V) = \frac{dQ_{qw}}{dV} = \frac{q^2}{kT} N_{2D}^{(n)} \cdot f_n(E_k, V) \cdot [1 - f_n(E_k, V)]. \quad (3)$$

#### The capacity of the media capture process

This element of the EC, together with the capture resistance, characterizes the inertia of the capture, described by the capture time  $\tau_{cap}$  and determined by its probability, i.e.  $\tau_{cap} = C_{cap} \cdot R_{cap}$ . Therefore, the capacitance of the electron capture process can be found from the following expression:

$$C_{cap}^{(n)} = \frac{\tau_{cap}^{(n)}}{R_{cap}^{(n)}} = qC_{cap}^{(n)} \cdot N_{2D}^{(n)} \tau_{cap}^{(n)} \times \left\{ \frac{d}{dV} [n_{dif}(E, z_t)(1 - f_n(E_k, V))] \right\}. \quad (4)$$

Capacities and resistances for holes are found in a similar way.

#### Conclusions

The expressions (1)–(3) are obtained for determining the numerical estimate of the equivalent capacitance and equivalent resistance of the equivalent circuit of the heterostructure under study. The expressions are obtained by applying the well-known classical model describing the behavior and interaction of electrons in the vicinity of the quantum well and inside it.

#### References

1. Martinez-Duart D.M. World of Materials and Technologies // Nanotechnologies for micro – and optoelectronics. – 2007. – P. 368–373.
2. Restriction of a number of levels of dimensional quantization in elements of Nanoelectronics / V.N. Davydov, O.F. Zadorozhny, O.A. Karankevich // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No. 3. – P. 2337–2342.
3. Electric and optical properties of staggered InGaN/GaN quantum-well light-emitting diodes/ S.H. Park, D. Ahn, B.H. Koo, J.W. Kim // Phys. Status Solidi. A. Appl. Matter. Sci. – 2009. – Vol. 206, No.11. – P. 2637–2640.

#### Davydov Valery Nikolaevich

Dr. of Engineering, Prof.,  
Department of Electronic Devices, TUSUR  
E-mail: dvn@fet.tusur.ru

#### Zadorozhny Oleg Fedorovich

PhD student, Department of Electronic Devices, TUSUR  
E-mail: Oleg9300@mail.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

## Секция 13

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатели секции – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, д-р техн. наук;  
Демаков Александр Витальевич, ассистент каф. ТУ, канд. техн. наук*

<b>К.Е. Зиновьев, А.А. Квасников, А. Алхадж Хасан</b> Графический интерфейс для расчёта характеристик антенн при проводно-сеточной аппроксимации в системе TALGAT .....	11
<b>А.О. Белоусов, В.О. Гордеева</b> Оптимизация модального фильтра с лицевой связью по алгоритму эволюционных стратегий с ограничениями .....	13
<b>А.О. Белоусов, Н.О. Власова, Т.Р. Газизов</b> Параметрическая оптимизация многопроводных модальных фильтров с круговым сечением в диапазоне реальных геометрических параметров .....	18
<b>В.Н. Невежин, А.В. Бусыгина</b> Обзор способов определения химических и биологических компонент в жидкостях при помощи СВЧ-устройств .....	22
<b>В.А. Семенюк, М.Е. Комнатнов, А.В. Демаков</b> Исследование излучаемой эмиссии микроконтроллеров при температурном воздействии.....	26
<b>П.А. Попов, Т.И. Третьяков, А.В. Демаков</b> Разработка измерительных печатных плат для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость в ТЕМ-камере.....	30
<b>А. Секенова, А.А. Иванов</b> Моделирование эффективности экранирования многослойных экранов на основе металлов и полимерных композитных материалов.....	34
<b>П.В. Микола, З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев</b> Анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков на основе диаграммы координата – время .....	37
<b>Д.М. Мочалов, Д.В. Клюкин</b> Алгоритмы визуализации результатов моделирования линий передачи методом конечных элементов .....	41
<b>Т.И. Третьяков, П.А. Попов, М.Е. Комнатнов</b> Экспериментальное исследование системы нагрева и охлаждения испытательного контейнера климатической экранированной камеры .....	44
<b>А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий</b> Вычисление временных откликов экранированного модального фильтра из двух каскадов в дифференциальном и синфазном режимах на воздействие типовых сверхкоротких импульсов .....	47
<b>А.Е. Максимов</b> Неравномерная сегментация границ многопроводной линии передачи для расчета физической матрицы коэффициентов электростатической индукции.....	50
<b>К.Н. Абрамова, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов</b> Разработка блока управления вентиляторами морозильной системы климатической экранированной камеры .....	53
<b>М.А. Самойличенко</b> Экранированный модальный фильтр на двухсторонней печатной плате.....	56
<b>С. Карри, Р.С. Суровцев</b> Анализ влияния потерь в проводниках и диэлектрике на форму и амплитуду сверхкороткого импульса в защитной меандровой линии .....	59
<b>В.А. Трубченинов, Н.О. Кузьмин, В.А. Сурков, Е.С. Жечев</b> Соединительные платы для проведения измерений модальных фильтров с круговым сечением .....	62
<b>Р.С. Суровцев, Н.А. Царегородцев, К.П. Малыгин</b> Распространение затухающей синусоиды в витке меандровой линии с воздушным заполнением .....	65

**Секция 14****АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ***Председатели секции – Кориков Анатолий Михайлович, проф. каф. АСУ, д-р техн. наук;**Катаев Михаил Юрьевич, проф.каф. АСУ, д-р техн. наук*

<b>Ю.В. Шабля, А.Д. Бобков</b>	
Разработка алгоритмов ранжирования и генерации по рангу для комбинаторного множества стандартных таблиц Юнга .....	71
<b>А.Б. Кураков, А.Б. Гомбоин</b>	
Разработка программного обеспечения обработки изображений движения человека .....	75
<b>С.М. Алфёров, Р.Е. Богачев, А.С. Бондаренко, А.А. Пивоваров, Д.А. Неверовский, С.Ю. Хотненко</b>	
Разработка системы автоматизированного управления отоплением .....	78
<b>Т.Б. Колкобаев</b>	
Реинжиниринг бизнес-процессов при внедрении ERP-системы. Анализ рисков внедрения ERP-систем на предприятии .....	82
<b>В.Т. Тран, А.М. Кориков, Т.Т. Нгуен</b>	
Моделирование гидравлической системы автоматической стабилизации .....	85
<b>А.В. Крайнов, Т.В. Ганджа</b>	
Разработка системы противопожарной сигнализации на базе программируемого логического контроллера с передачей данных по GSM-каналу .....	89
<b>И.А. Крючков</b>	
Выделение наиболее эффективных сочетаний каналов при анализе устойчивых зрительно вызванных потенциалов с помощью индекса многомерной синхронизации .....	92
<b>А.Б. Гомбоин, А.Б. Кураков</b>	
Программа для оценки параметров походки по скелетной модели человека с помощью видео .....	95
<b>А.С. Стецко, В.А. Гойник, В.В. Набиуллин</b>	
Выбор входного языка для графической среды программирования .....	97
<b>Ю.А. Матвиенко, В.В. Набиуллин, М.Ю. Катаев</b>	
Особенности построения ортофотоплана по данным БПЛА .....	100
<b>А.А. Мороз, К.С. Некипелов</b>	
Сравнение методов поиска локальных центров тяжести фигуры человека по ее изображению .....	103
<b>Д.К. Нгуен, С.В. Муравьев</b>	
Сегментация изображений методом наращивания областей при автоматическом обнаружении дефектов сварки .....	106
<b>С.В. Коновалов, Г.А. Волокитин, Р.С. Кульшин</b>	
Разработка высоконагруженного цифрового реестра учета воинских захоронений .....	110
<b>С.В. Коновалов, Г.А. Волокитин, Р.С. Кульшин</b>	
Разработка чат-бота для платформенного рекламного кабинета .....	113
<b>М.А. Беляева, Р.А. Сарибекян, А.С. Прокудин, А.В. Сороковиков, Н.Ф. Зимин</b>	
Анализ зависимости содержания CO <sub>2</sub> от температуры в течение года в атмосфере Земли по данным спутника GOAST .....	115
<b>Д.С. Злодеева</b>	
Исследование методов кластерного анализа и оценка качества кластеризации на примере данных клиентов банков .....	117

**Секция 15 121-122****ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ***Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУРа, д-р техн. наук, проф.*

<b>И.В. Альфедер, М.А. Гавриленко, И.Ю. Харина</b>	
Распознавание нажатых клавиш с помощью нейронной сети .....	123
<b>А.Э. Коренев, Г.С. Белокрылов, Р.Д. Брылев, Н.А. Калинин</b>	
Обзор на тему «Умные часы» .....	126
<b>И.Е. Вдовина, Е.А. Прозорова</b>	
Атаки по тепловому каналу .....	130
<b>М.А. Сысолина, В.С. Аврамчук</b>	
Оценка влияния шума на искажения физического уровня стандарта IEEE 802.11 .....	133

<b>К.И. Цимбалов, Д.С. Брагин</b>	
Анализ способов нарушения информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами .....	137
<b>К.И. Цимбалов, В.А. Фаерман</b>	
Моделирование атаки «отказ в обслуживании» на беспроводные локальные сети семейства IEEE 802.11 .....	140
<b>И.Е. Вдовина</b>	
Криптографическое искусство .....	145
<b>Е.М. Полещук, С.Е. Путилова, И.А. Щербинина</b>	
Анализ уязвимостей и угроз информационной безопасности морских портов .....	149

**Секция 16****ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

*Председатель секции – Сенченко Павел Васильевич, проректор по УР, доцент каф. АОИ, канд. техн. наук*

<b>А.В. Ермаков, Л.И. Сучкова</b>	
Разработка технологии и проектирование модели оперирования нечётких паттернов при принятии решений в коллективе автономных роботов.....	155
<b>А.А. Гавриленко</b>	
Ситуационный центр губернатора Томской области .....	158
<b>Е.В. Грива</b>	
Разработка информационной системы для сбора, анализа и представления данных о воронках продаж .....	163
<b>С.А. Кузнецов, А.Д. Вильнин</b>	
Сравнение методов оценки семантического сходства на основе doc2vec и tf-idf.....	166
<b>Д.А. Жуков</b>	
Разработка программной библиотеки распознавания смысла текста .....	169
<b>Е.А. Касьян, М.М. Немирович-Данченко</b>	
Использование метода анализа иерархий и критериального подхода для выбора модели прогнозирования индекса потребительских цен России .....	172

**Секция 17****ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБУЧЕНИИ**

*Председатель секции – Дмитриев Вячеслав Михайлович, проф. каф. КСУП, д-р техн. наук*

<b>А.В. Баранов</b>	
Экспериментирование и моделирование в виртуальных лабораториях физики .....	179
<b>Е.С. Костюк</b>	
Разработка программы дополнительного профессионального образования «Планирование и организация НИОКР» .....	182
<b>С.М. Левин</b>	
Новое поколение выбирает смешанное обучение .....	184
<b>В.А. Семиглазов, Т.Н. Мосунова, В.А. Акулякова</b>	
К вопросу об оценке потенциала конкурентоспособности .....	188

**Секция 18****ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ**

*Председатели секции – Курячий Михаил Иванович, доцент каф. ТУ, канд. техн. наук,  
Капустин Вячеслав Валериевич, доцент каф. ТУ, канд. техн. наук*

<b>М. Назарбек, Т.М. Акаева, А.А. Новгородов</b>	
Исследование методов и алгоритмов оценки пространственного разрешения цифровых телевизионных изображений.....	193
<b>Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин, Н.А. Бородина</b>	
Оценка влияния джиттера управляющих импульсов и шума фотоприемника на точность измерения дальности АИ ТИС .....	197

<b>В.С. Чебанов</b>	Параллельные вычисления с использованием CUDA-технологий .....	202
<b>А.С. Толмачева, А.В. Каменский</b>	Разработка двумерно-сепарабельного двухкаскадного пирамидального фильтра повышения четкости изображений .....	206
<b>А.А. Тисленко, А.В. Каменский</b>	Алгоритм исправления радиальной дисторсии посредством усреднения корректирующего коэффициента .....	209
<b>М.Е. Сукотнова, Г.Е. Эдель, В.В. Капустин</b>	Исследование эффективности работы алгоритмов автоматической идентификации лиц на базе методов LBP и Eigenface .....	213
<b>С.В. Смирнов, Т.О. Климкин</b>	Времяпролетные камеры и области их применения .....	217
<b>Т.М. Акаева, М. Назарбек, М.И. Курячий</b>	Исследование эффективности алгоритмов подавления шумов цифровых изображений .....	220
<b>А.А. Новгородов, Н.А. Бородина, М. Назарбек</b>	Исследование эффективности восстановления изображений, полученных активно-импульсной телевизионной системой с помощью сверточной нейронной сети шумоподавления .....	223
<b>Н.А. Бородина, А.А. Новгородов</b>	Создание и подготовка наборов данных для решения задачи классификации изображений с применением нейросетевых технологий .....	226
<b>О.Е. Гончарова, Н.М. Поломарчук, А.В. Каменский</b>	Исследование двумерного шестикаскадного фильтра повышения четкости изображения .....	230
<b>С.В. Серебrenников, В.А. Семиглазов</b>	Получение физической копии модели с использованием 3D-технологий .....	234
<b>Г.Е. Эдель, В.В. Капустин, М.Е. Сукотнова</b>	Исследование алгоритма распознавания пешеходов с использованием NVIDIA Jetson Nano и модели MobileNet V2 .....	237
<b>Г.Е. Эдель, М.Е. Сукотнова, В.В. Капустин</b>	Исследование алгоритма MobileNet V1 и его сравнение с MobileNet V2 на микрокомпьютере NVIDIA Jetson Nano .....	242
<b>А.В. Ященко, Т.О. Перемитина, И.Г. Ященко</b>	Космические снимки и информационные технологии для дистанционного зондирования Земли .....	246
<b>А.С. Захлебнн, М.И. Курячий</b>	Комбинированный метод построения геопривязанного ортофотоплана местности по изображениям с телевизионной камеры БВС вертолетного типа .....	250

### Секция 19

#### ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ И ВЕЙВЛЕТ-ФРАКТАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, канд. техн. наук*

<b>И.А. Бойко, Е.И. Глушанков</b>	Модифицированный алгоритм Ньютона в системах massive MIMO с прекодированием .....	255
<b>А.М. Голиков</b>	Оптимальное пеленгование на трассах распространения СВЧ-радиоволн .....	259
<b>Н.Н. Колесник</b>	Исследование модели LTE-A мобильной системы связи 5G .....	261
<b>А.М. Голиков, А.В. Лоскутникова</b>	Фрактальная обработка радиолокационных изображений .....	264
<b>Н.И. Воронцов, Г.И. Ляхов</b>	Модель радара с вейвлет-фильтрацией сигналов .....	267
<b>Е.И. Глушанков, Е.А. Рылов, А.А. Хренов</b>	Потенциальная эффективность систем морской радиосвязи с пространственной обработкой сигналов .....	269
<b>Е.А. Шинкевич</b>	Вейвлет-фильтрация радиолокационных сигналов .....	271

## Секция 20

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ**

*Председатель секции – Ходашинский Илья Александрович, проф. каф. КИБЭВС, д-р техн. наук*

**М.Б. Бардамова**

Отбор и настройка весов признаков метаэвристическими алгоритмами  
в нечетких классификаторах несбалансированных данных ..... 277

**Е.А. Чистякова**

Метаэвристика tree-seed algorithm для решения задачи оптимизации параметров  
нечеткого классификатора ..... 281

**В.С. Ерохин**

Тестирование метаэвристики Moth search algorithm для решения задачи оптимизации  
параметров термов нечеткого классификатора ..... 283

**К.К. Григорьев**

Применение алгоритма Нелдера–Мида в алгоритме роста дерева как метаоптимизатора  
при настройке нечеткого классификатора ..... 286

**А.А. Загородская, И.А. Ходашинский**

Формирование наборов данных для нечеткой классификации адресов электронных ресурсов ..... 289

**Д.А. Андреевских, Р.Е. Коломников, К.С. Сарин**

Система аутентификации пользователя по динамической рукописной подписи ..... 293

**Д.Д. Мёдов**

Исследование эффективности метаэвристики Yo-Yo Blind Man Algorithm для решения задачи  
оптимизации параметров нечеткого классификатора ..... 296

**Д.И. Новохрестова**

Комбинирующая оценка качества произношения слогов ..... 299

**М.С. Платонов**

Тестирование метаэвристического алгоритма Black Hole Algorithm в задаче оптимизации  
параметров термов нечеткого классификатора ..... 302

**П.А. Пухова, К.С. Сарин**

Модифицированный тест Фридмана для статистического сравнения качества  
классификации алгоритмов машинного обучения ..... 305

**С.А. Ильина, М.Е. Семёнов**

Разработка конфигуратора прогноза планово-предупредительных ремонтов  
с применением нейро-нечётких систем ..... 308

**В.С. Шайдорова**

Прогнозирование посещаемости разных категорий сайтов ..... 311

**А.О. Слезкин, И.А. Ходашинский**

Определение размера популяции для алгоритма стаи ласточек при решении задачи  
оптимизации параметров нечеткого классификатора ..... 314

**Б.Д. Цыбенков, М.О. Светлаков**

Отбор и выделение признаков сигнала ЭЭГ с помощью вейвлет-преобразования  
для аутентификации пользователя ..... 317

**Д.А. Воронин, И.А. Ходашинский**

Алгоритм «ворон» для оптимизации параметров нечеткого классификатора ..... 320

## Секция 21

**РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА**

*Председатели секции – Шурыгин Юрий Алексеевич, директор департамента управления  
и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д-р техн. наук, проф.;*  
*Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, канд. техн. наук*

**О.А. Брылев, А.С. Беляев, Е.А. Иванов**

Трудности определения проскальзывания колёс мобильного робота на неоднородной поверхности ..... 327

**Е.В. Ланин, В.А. Казанин, А.В. Бадьин, К.В. Дорожкин**

К вопросу о возможности создания автоматизированной системы для измерения  
диоксида углерода в нижней тропосфере Земли с использованием летающего дрона ..... 331

**А.С. Беляев, Д.В. Майтаева, А.А. Филипас**

Сравнение активной опорной и 4-тросовой систем обезвешивания  
на примере односекционной солнечной батареи ..... 334

**В.В. Желонкин, И.Д. Шабалин, Е.С. Польшцев, Е.С. Шандаров**

Разработка модуля-сопряжения нейрокомпьютерного интерфейса  
для управления мобильными роботами ..... 338

**Секция 24**

**RESULTS OF POSTGRADUATE AND MASTER STUDENTS' RESEARCH  
IN THE SPHERE OF ELECTRONICS AND CONTROL SYSTEMS**

*Председатели секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, канд. филос. наук;  
Соболевская Ольга Владимировна, ст. преп. каф. ИЯ; Шпит Елена Ирismetовна, ст. преп. каф. ИЯ*

**V.N. Davydov, O.F. Zadorozhny**

Calculation of serial-parallel equivalent circuit elements of a heterostructure with quantum wells ..... 343





*Научное издание*

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА  
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

XVII Международная научно-практическая конференция

**17–19 ноября 2021 г.**

Материалы докладов

**В двух частях**

**Часть 2**

**Electronic Devices and Control Systems**  
XVII International Scientific-practical Conference  
November 17–19, 2021  
Part 2

Верстка В.М. Бочкаревой  
Корректор В.Г. Лихачева

---

Издательство «В-Спектр»  
Подписано к печати 30.11.2021.  
Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать трафаретная.  
Печ. л. 22. Тираж 100 экз. Заказ 18.

---

Издано ТУСУР  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, ГК. Тел. (382-2) 70-15-24.

Издательство «В-Спектр». ИНН 7017129340  
634055, Томск, пр. Академический, 13-24. [bvm@sibmail.com](mailto:bvm@sibmail.com)