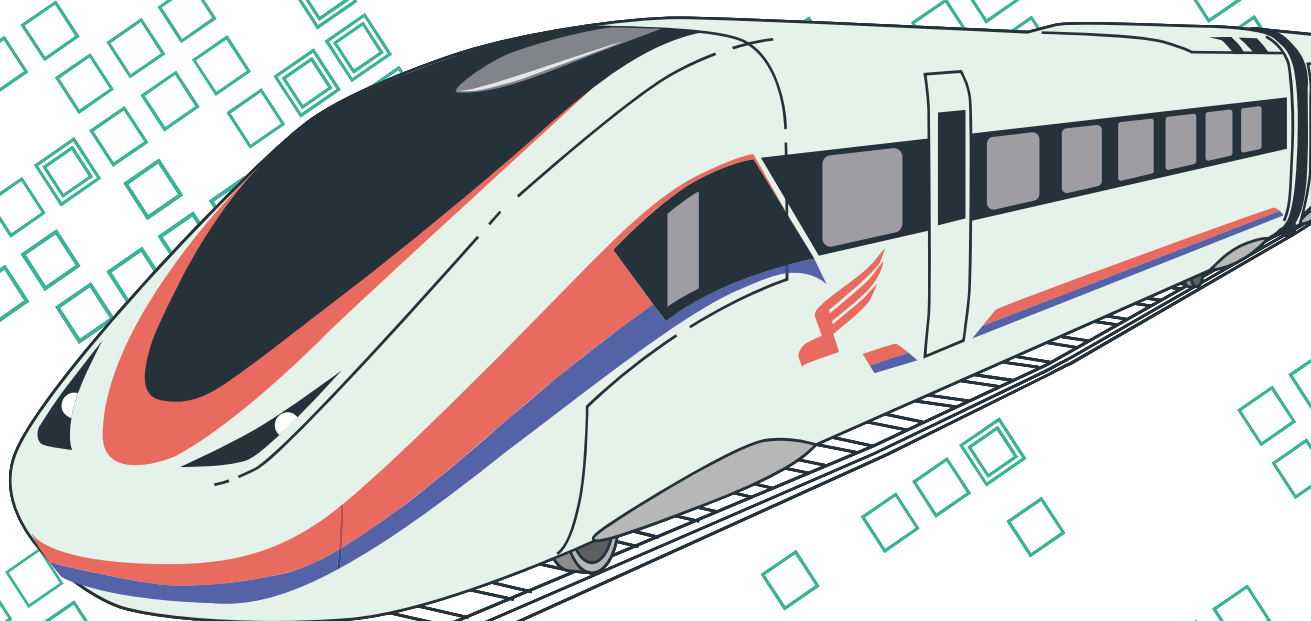


Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies
on Transport



Выпуск 2
2025

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ
(сетевой электронный научный журнал)
Выпуск 2 (42), 2025
ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет. Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований. Журнал основан в 2015 году.

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес редакции:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Телефон: +7 (812) 457-86-06

Сетевое издание «Интеллектуальные технологии на транспорте (сетевой электронный научный журнал), Intellectual Technologies on Transport» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07.05.2015.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>

Периодичность выхода — 4 номера в год.

Хомоненко А. Д., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — главный редактор

Божко Л. М., д. э. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — заместитель главного редактора

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Сопредседатели редакционного совета:

Валинский О. С., к. т. н., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чаркин Е. И., зам. гендиректора по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

Ададунов С. Е., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Дудин А. Н., д. ф.-м. н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Корниенко А. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Макаренко С. И., д. т. н., доц., ПАО «Интелтех», С.-Петербург, РФ
Меркурьев Ю. А., Dr. Habil., проф., член Латвийской АН, РТУ, Рига, Латвия
Титова Т. С., д. т. н., проф., первый проректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Александрова Е. Б., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Басыров А. Г., д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ
Баталов Д. И., к. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Безродный Б. Ф., д. т. н., проф., НИИАС, Москва, РФ
Благовещенская Е. А., д. ф.-м. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Бубнов В. П., д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ
Булавский П. Е., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Василенко М. Н., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Глухов А. П., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Гуда А. Н., д. т. н., проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, РФ
Ермаков С. Г., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Заборовский В. С., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Канаев А. К., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Котенко А. Г., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Куренков П. В., д. э. н., к. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Лецкий Э. К., д. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Наседкин О. А., к. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Никитин А. Б., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Новиков Е. А., д. т. н., доц., ВКА, С.-Петербург, РФ
Охтилев М. Ю., д. т. н., проф., НИО ЦИТ «Петрокомета», С.-Петербург, РФ
Привалов А. А., д. воен. н., проф., Академия войск национальной гвардии, С.-Петербург, РФ
Соколов Б. В., д. т. н., проф., СПб ФИЦ РАН, С.-Петербург, РФ
Таранцев А. А., д. т. н., проф., ИПТ РАН, С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И. Т., д. т. н., проф., АУЭС, Алматы, Казахстан
Фазылов Ш. Х., д. т. н., проф., НИИ развития цифровых технологий и ИИ, Ташкент, Узбекистан
Хабаров В. И., д. т. н., проф., СГУПС, Новосибирск, РФ
Ходаковский В. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чехонин К. А., д. ф.-м. н., доц., ХВИЦ ДВО РАН, Хабаровск, РФ

Intellectual Technologies on Transport
(Network electronic scientific journal)
Issue 2 (42), 2025
ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access.
It publishes articles in Russian and English with the results
of research and practical achievements in the field
of intelligent technologies and associated research.
Founded in 2015.

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education "Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under
contract N ЭА78751, 28.12.2024

Frequency of release — 4 issues per year.

Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Phone: +7 812 457 86 06

The online journal "Intellectual Technologies
on Transport" is registered by the Federal Service
for Supervision of Communications, Information
Technologies, and Mass Media.

El No. FS77-61707 Testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation
Index (RSCI).

Issues of the magazine are available
at <http://itt-pgups.ru>

Khomonenko A. D., Dr. Sci. in Engineering, Prof., PSTU,
St. Petersburg, Russia — Editor-in-Chief

Bozhko L. M., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia —
Deputy Editor-in-Chief

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS

Co-chairs of the Editorial Council:

Valinsky O. S., PhD in Engineering, rector
of PSTU, St. Petersburg, Russia

Charkin E. I., CIO of JSC "Russian Railways", Moscow, Russia

Adadurov S. E., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Makarenko S. I., As. Prof., Inteltech, St. Petersburg, Russia

Merkuryev Yu. A., Prof., Academician of the Latvian Academy
of Sciences, RTU, Riga, Latvia

Titova T. S., Prof., First Vice-Rector PSTU, St. Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Aleksandrova E. B., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Basyrov A. G., Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Batalov D. I., PhD in Engineering, PSTU, St. Petersburg, Russia

Bezrodny B. F., Prof., NIIAS, Moscow, Russia

Blagoveshchenskaya E. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P. E., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Vasilenko M. N., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Glukhov A. P., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Guda A. N., Prof., RSTU, Rostov-on-Don, Russia

Ermakov S. G., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Zaborovsky V. S., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Kanaev A. K., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kotenko A. G., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Kurenkov P. V., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Letsky E. K., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Nasedkin O. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Nikitin A. B., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Novikov E. A., As. Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Okhtilev M. Yu., Prof., JSC "Petrokometa", St. Petersburg, Russia

Privalov A. A., Prof., Academy of the National Guard Troops,
St. Petersburg, Russia

Sokolov B. V., Prof., SPC RAS, St. Petersburg, Russia

Tarantsev A. A., Prof., IPT RAS, St. Petersburg, Russia

Uteperbergenov I. T., Prof., AUPET, Almaty, Kazakhstan

Fazilov Sh. X., Prof., AIRI, Tashkent, Uzbekistan

Khabarov V. I., Prof., STU, Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk FRC RAS,
Khabarovsk, Russia

Содержание

Искусственный интеллект и транспортные системы

Андриенко В. А., Кияев В. И., Котова С. А.

Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий 5

Бараусов В. А.

Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда
на контролируемой поверхности. 20

Романов К. И., Бабаев А. А., Антонычева О. Л.

Нейросетевая классификация дефектов печатных плат 29

Петрушичева А. Ю., Дьяченко Н. И., Ермаков С. Г.

Цифровая трансформация медиапространства: машинное обучение в развитии коммуникаций
и формировании контента 42

Математическое моделирование и системный анализ

Бурсиан Е. Ю., Минеева Д. Д., Ушакова Т. И.

Структурный принцип при осуществлении мониторинга преподавания дисциплин
гуманитарного направления. 50

Микулик И. И., Благовещенская Е. А.

О прогностической способности расширенной модели Кокса: сравнительный анализ 58

Ходаковский В. А., Коротченко В. Д.

Синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки
сигналов с ограниченным спектром 71

Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

Дворников С. В., Казакевич Е. В., Маслова А. А., Ролдугина Е. И., Арнадская Ю. Е.

Выбор теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах сетей 5G 83

Наседкин О. А., Васильев Д. А., Бутузов М. А.

Система автоматического тестирования технологического программного обеспечения систем
микропроцессорной централизации 93

Информационная безопасность и защита данных

Кочуров Д. А.

Методика парирования сбоев и отказов в многомодульной вычислительной системе
на основе создания и репликации контрольных точек 103

Contents

Artificial Intelligence and Transport Systems

Andrienko V. A., Kiyaev V. I., Kotova S. A.

Smart Roads: The Use of Intelligent Systems and Multi-Agent Technologies5

Barausov V. A.

Simulation Model of an Asynchronous Method for Determining the Thickness of Ice on a Controlled Surface ... 20

Romanov K. I., Babaev A. A., Antonycheva O. L.

Neural Network Classification of Printed Circuit Board Defects.....29

Petrushicheva A. Yu., Dyachenko N. I., Ermakov S. G.

Digital Transformation of Media: Machine Learning in Communication Development and Content Creation42

Mathematical Modelling and System Analysis

Bursian E. Yu., Mineeva D. D., Ushakova T. I.

The Structural Principle for Monitoring the Teaching of Humanities Disciplines50

Mikulik I. I., Blagoveshchenskaya E. A.

Comparative Analysis of the Predictive Ability of the Extended Cox Model58

Khodakovsky V. A., Korotchenko V. D.

Orthogonal Basis Synthesis at a Finite Time Interval for Digital Signal Processing with Limited Spectrum71

Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

Dvornikov S. V., Kazakevich E. V., Maslova A. A., Roldugina E. I., Arnadskaya Yu. E.

Selection of a Test for the Type of Input Distribution in 5G Network Channels83

Nasedkin O. A., Vasiliev D. A., Butuzov M. A.

Automated Testing of Software Reliability for Computer-Based Interlocking systems.93

Information Security and Data Protection

Kochurov D. A.

Failure Management and Fault Tolerance Techniques in a Multi-Module Computing System Based on Creation and Replication of Checkpoints103

УДК 330.3

Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий

- Андриенко Виктор Александрович**¹ — старший преподаватель кафедры системного программирования. Научные интересы: искусственный интеллект, интеллектуальные агенты, мультиагентные системы, автоматизация разработки и обеспечения качества сложных программных продуктов, архитектура и проектирование информационных систем, цифровая трансформация, интеллектуальные транспортные системы. E-mail: winwork@mail.ru
- Кияев Владимир Ильич**² — канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры информатики. Научные интересы: разработка сложных систем, системный и процессный подходы, метрология и качество, умные агенты и мультиагентные системы, цифровая трансформация, гибридные системы. E-mail: kiyayev@mail.ru
- Котова София Александровна**² — магистрант 2-го курса направления 09.04.03 «Прикладная информатика». Научные интересы: искусственный интеллект, мультиагентные системы, интеллектуальные транспортные системы. E-mail: soniakotova2000@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Россия, 191023, Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, 30–32

Для цитирования: Андриенко В. А., Кияев В. И., Котова С. А. Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 5–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19

Аннотация. Представлен обзор международных проектов «умных дорог», показана роль технологий искусственного интеллекта и мультиагентных систем в управлении дорожно-транспортными системами. **Цель:** изучение и анализ международного опыта реализации проектов «умных дорог» и перспективы использования мультиагентных систем в данных проектах. **Результаты:** анализ показал разнообразие и значимость подобных проектов и позволил сгруппировать их по масштабу и направленности. Подтверждена перспективность использования искусственного интеллекта и мультиагентных систем в современной практике управления дорожно-транспортными системами. **Практическая значимость:** состоит в цифровизации и интеллектуализации дорожно-транспортной системы с целью повышения качества управления, эффективности и безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: умные дороги, *Vehicle-to-Everything*, искусственный интеллект, интеллектуальный агент, мультиагентная система, *robotic process automation*, дорожно-транспортная система, логистика, интеллектуальная транспортная система, безопасность дорожного движения, *vision zero*

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) повлияло практически на все сферы человеческой деятельности. Многие жители России имеют доступ к умным помощникам и ассистен-

там, таким как Алиса, Салют, Маруся, Секретарь, Робот Макс, и разнообразным чат-ботам. Компании все активнее стремятся использовать ИИ для автоматизации рутинных задач сотрудников с це-

лью экономии времени и затрат для существенно-го повышения эффективности ведения бизнеса. В последнее время известным примером широкого использования ИИ стал уникальный чат-бот ChatGPT, которым пользуются во многих странах. В первой трети 2023 года число пользователей ChatGPT превысило 130 миллионов человек по всему миру, что является рекордом пользовательского применения нейросетей.

Несмотря на растущую популярность и актуальность искусственного интеллекта, немногим известно, что в сфере логистического управления транспортными потоками и грузоперевозками ИИ стали постепенно внедрять еще около 15 лет назад. В статье проанализированы различные проекты «умных дорог», а также используемые в этих проектах технологии и решения.

Сравнение международных проектов «умных дорог»

Наиболее масштабными проектами являются предложение итальянских специалистов фирмы ANAS [1] и американский вариант «умной дороги» — Virginia Smart Roads [2] (табл. 1). Оба проекта имеют сложную и достаточно крупную инфраструктуру, включающую центр обслуживания и управления возникающими нестандартными ситуациями на трассах. При этом оба проекта имеют разные цели. Проект ANAS планирует добиться безопасного повышения предела скорости и общей безопасности на автотрассах. Американский проект направлен в первую очередь на тестирование эффективности современных технологий и разработок в области управления безопасностью на некоторых выделенных автодорогах. В будущем планируется открыть шоссе и для обычных автомобилистов. Достоинством итальянского проекта является наличие области с возобновляемой энергией (Green Land), которая будет подпитывать всю инфраструктуру, обеспечивающую эффективность и безопасность дороги. А Virginia Smart Roads имеет много технических средств, направленных на учет изменений погоды, освещенности и загруженности трассы, влажности дорожного покрытия и других условий.

В 2022 году в Чехии приступили к разработке стратегического проекта для городской среды. Проект получил название Mobile monitoring of selected elements of public space in the Capital City of Prague [3]. В рамках проекта создается система мониторинга городского транспортного движения, а также общественное пространство и его элементы с возможностью анализа изображений и возникающих ситуаций с использованием ИИ-технологий. Часть транспортных средств, которые регулярно перемещаются по Праге, будут оснащены видеокамерами, системой позиционирования (GNSS), вычислительным блоком, модулем передачи данных и другими датчиками и устройствами.

Собранные данные будут использованы для анализа текущей ситуации (транспортной инфраструктуры, парковки, остановок и т. д.). Система будет собирать необходимую информацию в режиме реального времени без вмешательства человека. Это достигается за счет распознавания конкретных элементов в общественном пространстве, их идентификации, обнаружения любых аномалий и отклонений, а также оценки конкретных инцидентов. Например, система позволит контролировать ширину проезда для транспорта экстренных служб, пространство вокруг контейнеров для отходов, парковку транспортных средств, работу мусороуборочных машин. На основе полученных данных будет создан аналитический интерфейс и специальные визуальные интерфейсы для администраторов элементов системы. Стоит отметить, что некоторые статистические данные из этой системы будут публиковаться на пражской информационной платформе Golemio, что повысит содержательность информации, предоставляемой населению Праги и других городов Чехии.

Выгоды от реализации данного проекта [3]:

- совершенствование управления общественным транспортом в Праге, в том числе упрощение и ускорение принятия решений;
- финансовая экономия;
- автоматизация технологических процессов;
- повышение безопасности граждан, их комфорта и осведомленности.

**Сравнение итальянского и американского видения
в части инфраструктуры «умных дорог»**

Категория	ANAS	Virginia Smart Roads
Статус	Национальное видение «умной дороги»	Транспортный исследовательский центр
Страна	Италия	США
Цель	Повышение безопасности дорог	Новое шоссе — прямой маршрут между I-81 и Блэксбургом. Исследовательская лаборатория для изучения автомобильных дорог и мостов, транспортных средств и транспортных систем, а также для разработки программных продуктов
Инфраструктура	Связь автомобиля с инфраструктурой: осуществляется за счет датчиков в автомобиле, мобильного телефона/планшета водителя автомобиля и специально разработанной сети Intranet на территории «умной дороги»	Метеорологические башни: 75 башен для создания дождя, снега и тумана. Для их функционирования установлен резервуар с водой объемом 1 892 706 литров
		Испытательный стенд с переменным освещением
		Система сбора данных на месте (DAS)
	Система контроля ситуации для служб безопасности: система на основе Vehicle-to-Infrastructure (V2I). Обеспечивает постоянный мониторинг ситуации на территории «умной дороги» в режиме реального времени	Дифференциальная глобальная система позиционирования (GPS)
		Система наблюдения за дорогой: усовершенствованная система связи на основе локальной беспроводной сети, соединенной с волоконно-оптической магистралью. Управление фазами светофора и их синхронизация обеспечивается за счет пульта дистанционного управления и SPaT (Signal Phase and Timing)
	Green Land: в этой области находятся системы производства и распределения возобновляемой энергии, которые питают всю инфраструктуру	Центр управления: обеспечивает контроль и обслуживание дороги. Он взаимодействует с автомобилями, отслеживает и управляет датчиками дорожного покрытия, электросенсорами, камерами наблюдения, системой прогнозирования погоды, освещением и дорожными знаками
		7 блоков беспроводного придорожного оборудования
		14 участков дорожного покрытия
		Фрикционная трасса открытого типа
		2 метеостанции

Существуют проекты, которые носят экологический и энергетический характер. Так, в Швеции [4], Великобритании [5] и Испании [6] уже используются дороги или элементы дорог, способные накапливать энергию и питать ею автомобили и окружающую инфраструктуру (табл. 2). Эти проекты имеют общую цель — альтернативный способ получения электроэнергии. Но если шведский проект прямо направлен на снабжение энергией электротранспорта, то в английском и испанском проектах предполагается снабжать электричеством окружающую дорожно-транспортную инфраструктуру.

Еще одной точкой приложения искусственного интеллекта стало его использование не только при

проектировании дорог, но и при проектировании туннелей.

В табл. 3 показаны реализованные проекты «умных туннелей». Такие туннели способны существенно повысить безопасность и сократить путь для автомобилистов или поездов. Среди данной группы проектов выделяется проект Малайзии SMART [7], так как это единственный «умный туннель», который имеет 3 этажа и 4 режима.

Режим № 1 используется при благоприятных погодных условиях. Если идет дождь, то туннель переходит в режим № 2 — на нижнем этаже скапливается вода, но оба верхних этажа открыты для проезда транспортных средств. Режим № 3 отличается от второго тем, что при сильных ливнях

Таблица 2

Энергетические «умные дороги» и технологические решения

	Компания-разработчик, название проекта		
	Electreon, Smartroad Gotland	Highway Energy Systems Ltd.	Repsol, Roads as energetics corps
Год реализации	2020	2009	2012
Страна	Швеция	Великобритания	Испания
Место	Дорога между аэропортом и центром города Висбю на острове Готланд	Автостоянка супермаркета в Глостере	—
Идея	Предкоммерческий демонстрационный проект электрифицированной дороги	Электрокинетические энергетические пандусы	Пьезоэлектрические дороги
Описание	Проезжая по такой дороге, электрические транспортные средства могут заряжаться прямо от «умной дороги». Дорога выступает аналогом беспроводной зарядки, поскольку автомобилям не потребуются тяжелые и дорогостоящие аккумуляторы. Использование такой дороги направлено на сокращение выбросов CO ₂ в атмосферу	Автомобили, проезжая по пандусу, вырабатывают кинетическую энергию, которая передается на специальный двигатель для преобразования кинетической энергии в электрическую	Устройства, встроенные в асфальт, перерабатывают давление и вибрацию от проезжающих по асфальту автомобилей в электрическую энергию из расчета 1 кВт·ч на 12 м дороги
Где используется энергия	Для зарядки электромобилей, электробусов и электрических грузовиков во время их движения	Двигатель вырабатывает энергию, которая питает все кассовые аппараты в магазине	Дороги с большим и постоянным потоком машин

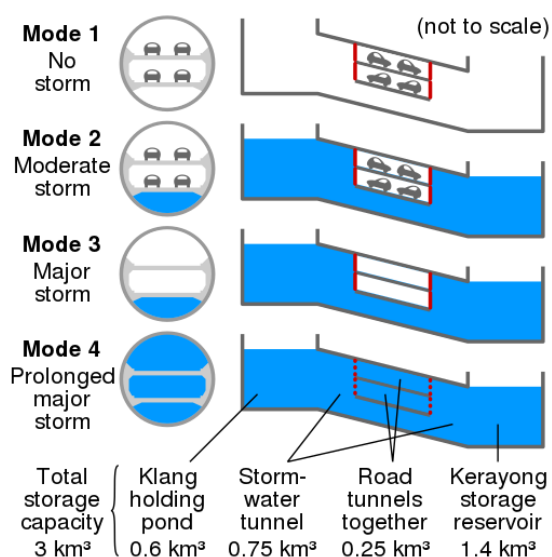


Рис. 1. Режимы «умного туннеля» SMART

проезд по первым двум этажам закрыт. А режим № 4 активируется при чрезмерных осадках: все три этажа наполняются водой и используются для сбора и отвода воды [7]. Иллюстрация режимов работы туннеля приведена на рис. 1.

На фоне развития «умных дорог» стали появляться решения и для общественного транспорта. На данный момент самые известные решения принадлежат Китаю [8] и Чехии [9] (табл. 4). Оба проекта схожи в том, что общественный транспорт предполагается снабдить автопилотом на осно-

ве ИИ. Это может привести к тому, что водитель в общественном транспорте нужен будет только для контроля управления и реагирования в критических ситуациях или необходимость в водителях может совсем исчезнуть.

Несколько лет назад появилась идея укладывать на дороги специальное покрытие, которое с помощью специальных устройств преобразовывало, накапливало и отдавало энергию солнечного света и тепла. Такие проекты разрабатываются как в США [10], так и в Европе — во Франции [5] и Голландии [6]. В США и во Франции в солнечные панели встраивают микропроцессоры, датчики и теплообменники. Такими панелями покрывают дороги с большой загруженностью. В Голландии же разработали специальное покрытие для велодорожек: велодорожку покрывают бетоном со встроенными фотоэлектрическими элементами. Сравнение проектов приведено в табл. 5.

Кроме того, во многих странах разрабатываются решения, устройства и системы, которые могут быть использованы в составе «умных дорог» [11] (табл. 6). Например: решения для анализа и контроля ситуации на дороге с воздуха, а также решения, встроенные в инфраструктуру (web-платформа, «умный светофор» и т. п.).

Таблица 3

«Умные туннели»

	Название туннеля			
	SMART Tunnel	Cereixal tunnel	Gotthard Base Tunnel	Tunnel Markovec
Страна	Малайзия	Испания	Швейцария	Словения
Особенности	Двухъярусная дорожная инфраструктура сокращает время в пути, а также защищает от затопления во время сильных штормов благодаря 4 специальным режимам	Повышение эффективности управления инфраструктурой обеспечивается за счет связи между транспортными средствами при помощи технологий V2G (Vehicle-to-Grid) и 5G	Железнодорожный туннель проходит от Эрстфелда до Бодио через Альпы. Он является одним из самых оптимизированных туннелей, через который ходят сотни поездов	Безопасность обеспечивается за счет использования сотен датчиков и камер численностью более 90 штук

Таблица 4

Решения для общественного транспорта

	Название проекта	
	X-Bus	ЭМА
Компания-разработчик	Huawei	Skoda
Страна	Китай	Чехия
Описание	На основе информации от инфраструктуры автобус может ездить по маршруту, делать остановки, объезжать препятствия	Система управляет движением трамвая без участия водителя
Особенности	В инфраструктуру (светофоры, дорожные знаки и т. д.) встроены датчики, которые за счет двухсторонней связи обмениваются информацией с автобусом. Это позволяет предоставить автобусу приоритет на дороге и предотвратить нарушение расписания	Система управляет трамваем на сложных участках дороги, что позволит трамваю также ездить по кривым. Кроме того, она контролирует температуру воздуха в трамвае, уровень освещения, объявляет остановки и контролирует уровень шума колес

Таблица 5

Сравнение проектов по использованию солнечной энергии и тепла

	Название проекта			
	Solar Roadways	Дорога на основе технологии Wattaway от Colas	Power Road	SolaRoad
Страна	США	Франция	Франция	Голландия
Покрытие	Солнечные панели в виде шестиугольников со встроенными микропроцессорами	Солнечные панели, покрытые листами кремния	В дорожное покрытие встраиваются теплообменники	Бетонная велодорожка длиной в 70 метров. В бетон встроены фотоэлектрические элементы
Как используется солнечная энергия	В зависимости от температуры и освещенности микропроцессоры включают нагревательные элементы и настраивают яркость светодиодов	Панели улавливают солнечную энергию. Один километр такой дороги способен обеспечить энергией уличное освещение в городе с населением в 5000 человек	Благодаря теплообменникам дорога улавливает солнечную энергию, накапливает ее и с помощью тепловых насосов отправляет в близлежащие объекты инфраструктуры. Также за счет этой энергии можно нагревать дорожное покрытие для таяния снега зимой или охлаждения дороги летом	Солнечный свет поглощается солнечными батареями и преобразуется в электричество. Оно может быть использовано для питания окружающей инфраструктуры. За первые 6 месяцев такая велосипедная дорожка выработала электроэнергию в 3000 кВт·ч, которой может хватить для питания целого дома в течение года

Таблица 6

Решения для «умных дорог»

Разработчик	Страна	Идея	Описание
Bercman	Латвия	Съемка дорожной ситуации с воздуха	Устройство является интеллектуальным решением для управления дорожным движением: отслеживание скорости автомобилей и нарушений правил дорожного движения. Блок управления перекрестками взаимодействует с транспортными средствами и другой инфраструктурой (Vehicle-to-Infrastructure, V2I)
Asimob	Испания	Система для мониторинга и анализа дорожной ситуации	Сервисы, разработанные на основе ИИ, отслеживают дорожные знаки и условия, сооружения и ремонтные работы. Кроме того, система автоматически распознает дорожные неровности и знаки опасностей для создания цифровой карты и более точного анализа дорог и дорожного движения
P3Mobility	Канада	«Умный светофор»	Проект предоставляет интеллектуальные сигналы светофора, а также управление движением по полосам, ориентированное на автономные транспортные средства, и другие решения для умного города. Система обеспечивает связь Vehicle-to-Everything (V2X)
Valerann	Израиль	Web-платформа для управления дорожным движением	Web-платформа использует данные с датчиков и транспортных средств, подключенных к системе. Она работает в режиме реального времени благодаря интеграции с беспроводными датчиками на основе технологии интернета вещей (IoT)
Road Sense Advanced Technologies	Израиль	Автономные датчики для интеллектуальных дорожных приложений	Датчики имеют вид дорожных шипов. Такой дизайн избавляет от необходимости портить дорожное покрытие для их установки. Автономные датчики, разработанные на основе IoT, собирают широкий спектр данных для минимизации рисков дорожного движения

Отечественные проекты «умных дорог»

В Российской Федерации также ведутся разработки в области «умных дорог». На сегодняшний день Центральная кольцевая автомобильная дорога (ЦКАД) является самой технически оснащенной трассой в России и стала самым масштабным проектом в области дорожной инфраструктуры в московском регионе. Трасса оснащена современной системой взимания платы, элементами технологии V2X, которая позволяет автомобилю «общаться» с различными управляющими устройствами, другими транспортными средствами и окружающей дорожной инфраструктурой. Вследствие этого число аварий снизилось в 2 с лишним раза, а скорость реагирования аварийных комиссаров не превышает 15 минут [12].

В конце 2020 года компании — участницы рынка Национальной технологической инициативы «Автонет» (AutoNet) провели первые в России испытания совместимости оборудования и программного обеспечения V2X, поддерживающего международные стандарты серии Intelligent Transport Systems (ETSI ITS-G5) [13]. Эти стандарты обеспечивают работу с программными приложениями и облачными сервисами в режимах передачи данных «авто-

мобиль — автомобиль» (Vehicle-to-Vehicle, V2V) и «автомобиль — обеспечивающая инфраструктура» (Vehicle-to-Infrastructure, V2I). Эти же стандарты определяют требования к оборудованию и программному обеспечению, предназначенным для обеспечения безопасности дорожного движения, повышения эффективности его организации и использования высокоавтоматизированных транспортных средств.

Летом 2022 года в Санкт-Петербурге начали реализацию первого в Российской Федерации коммерческого проекта по развертыванию сетей V2X на общественном транспорте. Основная задача — обеспечить приоритетный проезд общественному транспорту. В случае возникновения заторов сеть изменяет режим работы светофоров, что позволяет оптимизировать пассажиропоток и обеспечить минимально необходимое количество транспорта на линии. В сентябре 2022 года 35 перекрестков оснастили устройствами дорожной инфраструктуры вида Road Side Unit (RSU TEDIX-R1). Первые RSU были установлены в Калининском, Кировском, Красносельском и Приморском районах. Также до конца 2022 года администрация города планировала закупить 138 трамваев, в которых будут предустановлены устройства V2X. В дальней-

шем планируется оснастить таким оборудованием и троллейбусы [13].

Важным событием в развитии дорожно-транспортной инфраструктуры в России стал успешный запуск проезда беспилотных грузовиков большой вместимости 14 июня 2023 года по трассе М-11 из Санкт-Петербурга в Москву. Это событие может стать сильным толчком к развитию беспилотного транспорта по всей России.

Предложение о внедрении мультиагентной системы

Следует отметить, что наряду с применением технологий искусственного интеллекта все большую популярность в сфере управления логистическими процессами набирают мультиагентные системы (МАС). В 2024 году ассоциация ФинТех выделила развитие МАС как один из 10 основных трендов ИИ [14]. Это связано с тем, что МАС в режиме реального времени способна обрабатывать большое количество разнообразных данных, получаемых с различных физических датчиков и робототехнических устройств. Кроме того, внедрение МАС в сложные экономико-управленческие системы в логистике позволяет создать адекватное единое информационное пространство

для всех участников, использующих такую систему [15, 16].

Без использования мультиагентных систем реализация данных масштабных проектов была бы невозможна. В научной литературе понятие «мультиагентная система» отождествляют с такими терминами, как интеллектуальный агент, искусственный интеллект и т. п. [17–20] (табл. 7).

Рассматривая МАС как сложноструктурное образование, включающее несколько агентов, которые могут быть разных видов и выполнять различные функции, Х. Нвана (H. Nwana) предлагает следующую классификацию агентов [21]:

- Collaborative agents (сотрудничающие агенты);
- Collaborative agents with learning (memory) ability (сотрудничающие агенты со способностью к обучению (памяти));
- Interface agents (интерфейсные агенты);
- Truly intelligent agents (действительно (истинно) интеллектуальные агенты).

По экспертным оценкам, наиболее распространенным видом агентов являются сотрудничающие агенты со способностью к обучению. Но на текущий момент выявлено активное развитие и внедрение нового типа агентов — действительно интеллектуальных агентов.

Таблица 7

Подходы к определению сущности понятия МАС

Автор (источник)	Формулировка понятия
ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта [17]	Агент — «физический/программный объект, который оценивает собственное состояние, состояние других объектов и окружающей среды для выполнения действий, включая прогнозирование и планирование, которые максимизируют успешность, в том числе при неожиданном изменении оцениваемых состояний, достижения своих целей». Многоагентная система — «система, состоящая из множества взаимодействующих интеллектуальных агентов. Многоагентные системы могут решить проблемы, которые трудны или невозможны для отдельного агента или для единой (монолитной) системы»
Л. А. Гуревич, А. Н. Вахитов [18]	«Мультиагентные системы созданы для решения различных задач искусственного интеллекта, в которых присутствует несколько участников. Основным понятием является агент». «Агент — нечто, что способно воспринимать свое окружение через сенсоры и изменять его своими действиями»
А. Э. Кокаев, Р. В. Сущеня [19]	«Мультиагентные системы (МАС) — это системы, состоящие из нескольких взаимодействующих между собой автономных агентов. Каждый агент может взаимодействовать с другими агентами и окружающей средой для достижения определенных целей»
К. С. Амелин, Н. О. Амелина, О. Н. Граничин, В. И. Кияев [20]	«В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или элемент искусственного интеллекта»

Таблица 8

Проекты компании «Разумные решения»

Название проекта	Предметная область	Описание
Smart Airport	Управление наземными сервисами аэропорта	Система моделирует наземные сервисы, предоставляемые аэропортом, например подачу трапа, доставку багажа на борт самолета работниками аэропорта, доставку пассажиров на борт самолета и т. п.
Smart Truck	Управление грузоперевозками транспортно-экспедиционных компаний	Система предоставляет интеллектуальную помощь диспетчерам и заказчикам компании. Система способна распределять, планировать и оптимизировать заказы, контролировать местоположение ресурсов на электронной карте, помогать клиентам вводить заявки и отслеживать их выполнение с помощью электронной карты и многое другое
Smart Factory	Внутрицеховое планирование	Система способна проводить оперативное планирование и оптимизацию ресурсов цеха, включая трудовые и материальные ресурсы
Smart Aerospace	Планирование грузопотоков Международной космической станции	Система рассчитывает объемы и планирует поставки грузов на станцию с учетом их размещения. Кроме того, она способна планировать деятельность экипажа станции и разрабатывать программы полета
Smart Railways	Планирование движения поездов	На основе суточного графика система создает расписание движения поездов или пересчитывает уже существующие графики с учетом приоритетов поездов, закрытия перегонов или задержек движения

В настоящее время в России и за рубежом уже реализуются проекты по разработке МАС для управления дорожным движением и повышением его безопасности. В нашей стране, в частности, реализацией таких проектов занимается самарская научно-производственная компания «Разумные решения» [22, 23]. Проекты (табл. 8) охватывают многие сферы планирования и моделирования транспортного бизнеса: наземные сервисы аэропортов, грузоперевозки (в том числе для Международной космической станции), внутрицеховое планирование, планирование движения поездов и другие.

В Великобритании реализацией проектов на основе интеллектуальных агентов занимается компания Magenta Technologies [24]. Проекты в первую очередь направлены на управление заказами и перевозками (табл. 9).

Рассмотрим использование МАС, имеющих потенциал в области развития транспортно-логистических систем. К примеру, в систему ЦКАД в Москве можно внедрить «умного» агента со способностью к обучению (рис. 2), который будет отвечать за обработку дорожно-транспортных происшествий (ДТП): такой агент будет получать информацию с камер и датчиков на ЦКАД в режиме реального времени, оперативно устанавливать факт аварии и анализировать ее характеристики. При возникновении аварии агент будет заносить данные о происшествии в базу: дату, время, место, тяжесть аварии, количество участников аварии, причину аварии (при должном обучении агента), сохранять ссылки на записи с камер. Также агент может формировать и отправлять заявки/уведомления о ДТП оператору с характеристиками аварии и перечнем

Таблица 9

Проекты Magenta Technologies

Предметная область использования системы	Описание
Планирование и управление заказами в реальном времени	Система способна автоматически составлять расписание для выполнения заказов с учетом местоположения заказов и транспортных средств, смен прицепов, сложных перекрестных стыковок. Система планирования взаимодействует с онлайн-платформой, где клиенты могут формировать свои заказы и отслеживать их
Динамическое планирование перевозок пациентов	Система облегчает процесс заказа транспортировки пациентов медперсоналу больниц за счет автоматического динамического планирования в реальном времени
Управление перевозками	Система предоставляет поддержку для принятия решений при составлении расписаний. Кроме того, она обеспечивает защищенную среду для обмена информацией между клиентами и субподрядчиками

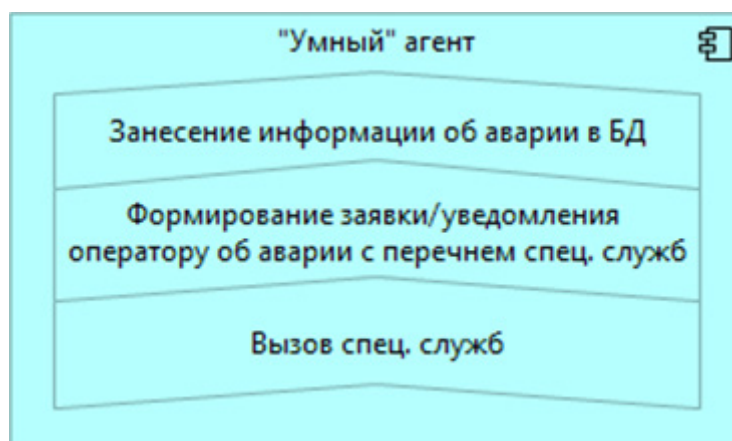


Рис. 2. Пример «умного» агента для ЦКАД

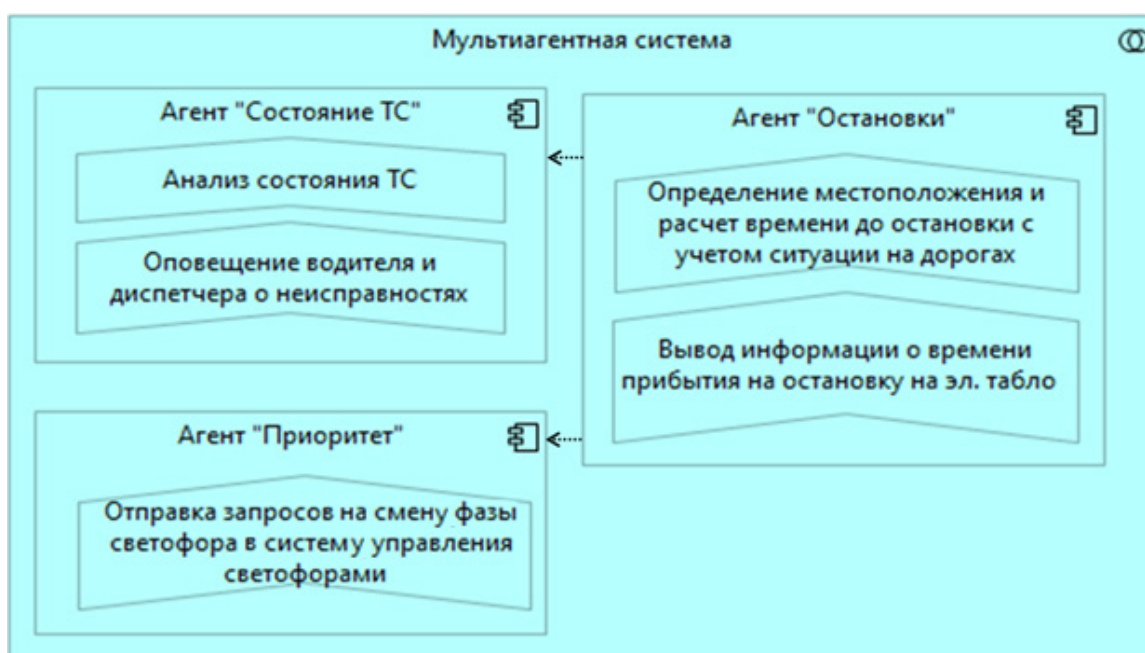


Рис. 3. Пример МАС для общественного транспорта

служб, которые необходимо вызвать. Более того, при дополнительном обучении такой агент сможет самостоятельно вызывать соответствующие службы для устранения последствий ДТП.

Для общественного транспорта можно разработать прототип мультиагентной системы (рис. 3).

Агент «Состояние ТС» анализирует состояние транспортных средств на наличие сбоев и поломок. При обнаружении неисправностей агент отправляет тип сбоя/поломки и их критичность водителю и диспетчеру. Всего можно определить 3 уровня критичности: 1) не критично — можно продолжить путь по маршруту; 2) критично — необходимо высадить пассажиров

на остановке и проследовать в автопарк; 3) особо критично — необходимо остановить транспортное средство, высадить пассажиров и вызвать ремонтную бригаду.

Агент «Остановки» определяет местоположение транспортного средства и рассчитывает время прибытия на следующую остановку с учетом текущей ситуации на дороге. Информацию о времени прибытия он будет отправлять на электронное табло внутри автобуса/троллейбуса/трамвая, а также на электронное табло на остановке.

Агент «Приоритет» при приближении общественного транспортного средства к светофору на определенном расстоянии отправляет запрос на

смену фазы светофора в систему управления светофорами.

В данном примере мы видим возможность использования истинно интеллектуальных агентов, которые самостоятельно принимают комплексные решения об управлении фазами светофора и информировании о времени прибытия на остановках общественного транспорта. При этом в рассмотренной МАС агент «Состояние ТС» является сотрудничающим агентом. Несмотря на то, что он не обучается самостоятельно, в случае поломки (в том числе в результате ДТП) этот агент оперативно передаст данные о происшествии агенту «Остановки», который пересчитает время и контрольные точки прохождения маршрута.

Агент «Приоритет» также участвует в работе агента «Остановки», так как при предоставлении приоритета общественному транспорту сокращается длительность маршрута, о которой агент «Остановки» должен проинформировать пассажиров и пешеходов.

Кроме того, в России активно развивается ряд разработок в сфере МАС. Первый — FractalGPT [25]. Это мультиагентный искусственный интеллект, позволяющий создавать ИИ-сотрудников, работа которых состоит из сложных задач, меняющихся в реальном времени. С его помощью можно разработать ИИ-оператора системы или ИИ-диспетчера автопарка.

Вторым является ROGEMA (Partially-Observable Grid Environment for Multiple Agents) от компании AIRI. Это открытый бенчмарк, предназначенный для оценки, анализа и сравнения алгоритмов для задач многоагентного планирования. Эта среда может быть адаптирована и настроена под различные PO-MAPF (задача поиска путей для множества агентов в условиях частичной наблюдаемости) [14].

Третий — Albato от компании Yandex. Это no-code-сервис, который позволяет настроить собственную интеграцию между сервисами, например amoCRM с «Яндекс Метрикой», «Битрикс24» с «Яндекс Аудиторией» и MindBox, Trello с YandexGPT и Google Sheets. На текущий момент Albato предлагает интеграцию с более чем 800 сервисами [14, 26].

Гибридное платформенное решение

Особый интерес в качестве дальнейшего развития данных идей может представлять гибридное платформенное решение (ГПР), объединяющее различные технологические подходы для повышения эффективности управления дорожно-транспортной инфраструктурой и состоящее из следующих компонентов:

- интеллектуальных агентов, взаимодействующих в мультиагентной системе;
- технологий искусственного интеллекта;
- технологий автоматизации бизнес-процессов с помощью программных роботов (Robotic process automation, RPA).

В таком гибридном платформенном решении МАС могла бы отвечать, в качестве центра управления, за мониторинг и диспетчеризацию, ИИ — за анализ данных и подготовку вариантов решений, RPA — за выполнение рутинных операций. При этом ГПР должно включать в себя весь необходимый набор инструментов и обеспечивать непрерывное взаимодействие компонентов на основе комплексной математической модели и микросервисной архитектуры.

Функционирование предлагаемого ГПР можно представить следующим образом. Мультиагентная система, выступая в роли распределенного центра управления, непрерывно получает данные о текущем состоянии дорожной инфраструктуры: с датчиков трафика, камер видеонаблюдения, интеллектуальных светофоров, транспортных средств, аварийных служб и от других агентов. Каждый агент в МАС отвечает за определенный участок дороги или тип информации, обменивается данными с другими агентами и принимает локальные решения на основе заданных правил и текущей дорожной обстановки. Полученные данные агрегируются и передаются модулям искусственного интеллекта для более глубокого анализа.

ИИ-компонент является аналитическим ядром системы и выполняет интеллектуальную обработку и анализ полученных данных, выявляя аномалии трафика, прогнозируя формирование заторов и вероятность возникновения аварийных ситуаций. На основе аналитических выводов ИИ предлагает

оптимальные сценарии реагирования, которые передаются обратно в мультиагентную систему. Взаимодействие ИИ- и МАС-компонентов позволяет интеллектуальным агентам адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям, динамически корректируя свои стратегии поведения.

Интеллектуальные агенты МАС принимают полученные от ИИ-компонента рекомендации и, координируя между собой свои действия, организуют диспетчеризацию: перестраивают световые циклы, регулируют направление потоков транспорта, информируют водителей о сложной дорожной обстановке, оптимизируют движение общественного транспорта, инициируют вызов экстренных служб в случае инцидентов.

В свою очередь, RPA-компонент на основе полученного от ИИ анализа и непрерывно поступающей от МАС информации автоматизирует административные и операционные процессы, рассылая различные уведомления участникам дорожного движения, регистрируя и сопровождая аварийные заявки, уведомляя различные дорожные службы и выполняя прочие рутинные операции. Таким образом, RPA значительно ускоряет выполнение рутинных задач, снижая нагрузку на операторов и ускоряя процесс принятия решений.

Стоит отметить, что, несмотря на существование отдельных научных исследований, посвященных возможности частичной интеграции описанных компонентов (например, [27–29]), известное авторам комплексное решение, объединяющее все представленные компоненты (ИА в МАС, ИИ и RPA), подобное предложенному гибриднему платформенному решению, в настоящий момент отсутствует.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Smart Road Book — The Intelligent Road That Runs with Progress. 156 p. URL: [http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_\(eng\).pdf](http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_(eng).pdf) (дата обращения: 20.05.2023).
2. Virginia Smart Roads // Virginia Tech Transportation Institute. URL: <http://www.vtti.vt.edu/facilities/virginia-smart-roads.html> (дата обращения: 04.03.2025).
3. Mobile Monitoring of Selected Elements of Public Space in the Capital City of Prague // Smart Prague. URL: http://smartprague.eu/projects/mobile_monitoring_of_selected_elements_of_public_space_in_the_capital_city_of_prague (дата обращения: 10.06.2023).
4. Smartroad Gotland. URL: <http://www.smartroadgotland.com> (дата обращения: 20.05.2023).

Заключение

В процессе анализа международных проектов внедрения и использования интеллектуальных систем на транспорте было выявлено большое количество стратегически значимых проектов, направленных как на анализ и исследование дорожных ситуаций, так и на совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры, оптимизацию и повышение безопасности дорожного движения. Многие проекты нацелены не только на повышение безопасности, но и на улучшение экологии за счет использования альтернативных источников энергии.

Российская Федерация также является одним из лидеров внедрения и использования интеллектуальных систем на транспорте. Анализ зарубежного опыта в решении различных задач цифровизации и цифровой трансформации на транспорте позволит сформировать в России новый пул задач, определить направления инновационного развития и ускорить интеллектуализацию дорожно-транспортной системы в целом. Особенно интересен здесь опыт реализации инновационных проектов дорожно-транспортной инфраструктуры в Китайской Народной Республике. Благодаря наработкам иностранных и российских специалистов в будущем появится возможность запустить беспилотный общественный транспорт и в других странах, повысив общий уровень безопасности дорожного движения. Кроме того, подобные проекты способны обеспечить нас возобновляемыми источниками энергии, которые сократят количество выбросов вредных веществ в атмосферу.

5. Alonso T. Recovering Energy from Traffic: Positive Energy Roads // Tomorrow.City. 2020. 27 November. URL: <https://tomorrow.city/a/recovering-energy-from-traffic-positive-energy-roads> (дата обращения: 04.03.2025).
6. Pérez de Lema M. Nuevas Formas de Generación // Energética XXI. 2014. No. 146. Pp. 84–86.
7. Martínez Euklidiadas M. Smart Tunnel: What Is It, How Does It Work and the Real Example of Malaysia // Tomorrow.City. 2021. 16 July. URL: <http://tomorrow.city/smart-tunnel> (дата обращения: 04.03.2025).
8. Now in China, Smart Roads That Talk to Driverless Cars // NDTV World. 2021. 14 January. URL: <http://www.ndtv.com/world-news/chinas-huawei-develops-smart-roads-that-talk-to-driverless-cars-2352262> (дата обращения: 04.03.2025).
9. В пражских трамваях появится автопилот // Винегрет. 2016. 14 апреля. URL: <http://www.vinegret.cz/29676/v-prazhskih-tramvayah-poyavitsya-avtopilot> (дата обращения: 19.08.2023).
10. Solar Roadways. URL: <http://solarroadways.com> (дата обращения: 20.05.2023).
11. 5 Top Smart Road Solutions impacting Smart Cities // StartUs Insights. URL: <http://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-smart-road-solutions-impacting-smart-cities> (дата обращения: 20.05.2023).
12. Центральная кольцевая автомобильная дорога. URL: <http://centralroad.ru> (дата обращения: 20.05.2023).
13. Меньше пробок, выше безопасность: как в России внедряется V2X // NTI Platform. 2022. 26 сентября. URL: <http://vc.ru/transport/508506-menshe-probok-vyshe-bezopasnost-kak-v-rossii-vnedryaetsya-v2x> (дата обращения: 20.05.2023).
14. 10 трендов искусственного интеллекта 2024. Ассоциация ФинТех, 2024. 45 с. URL: http://cifrastroy.ru/uploads/files/10_Trendov_II.PDF (дата обращения: 26.02.2025).
15. Алибеков Б. И., Мамаев Э. А. Мультиагентные системы в логистике: информационно-аналитические аспекты // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2017. Т. 32, Вып. 4. С. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62.
16. Морозова Ю. А. Мультиагентные системы в логистике: анализ опыта и перспективы // Логистика и управление цепями поставок. 2015. № 2 (67). С. 69–76.
17. ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта = Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 г. № 1372-ст: дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ, 2021. 15 с.
18. Гуревич Л. А., Вахитов А. Н. Мультиагентные системы // Введение в Computer Science: открытый студенческий семинар (Санкт-Петербург, Россия, декабрь 2004 — май 2005). URL: http://masters.donntu.ru/2012/fknt/stropalov/library/pdf/multiagent_system.pdf (дата обращения: 17.03.2025).
19. Кокаев А. Э., Суцень Р. В. Области применения и платформы для разработки мультиагентных систем. Свойства мультиагентных систем // Вестник науки. 2023. № 7 (64), Т. 5. С. 219–222.
20. Разработка приложений для мобильных интеллектуальных систем на платформе Intel Atom: учебное пособие / К. С. Амелин, Н. О. Амелина, О. Н. Граничин, В. И. Кияев. 2-е изд. М.: ИНТУИТ, 2016. 201 с.
21. Nwana H. S. Software Agents: An Overview // Knowledge Engineering Review. 1996. Vol. 11, No. 3. Pp. 205–244. DOI: 10.1017/S026988890000789X.
22. Кияев В. И., Дятлов К. А. Использование IoT-технологий для мониторинговых систем в хозяйственной деятельности // Гипотеза. 2020. № 2 (11). С. 17–25.
23. Adaptive Planning for Supply Chain Networks / M. Andreev, G. Rzevski, P. Skobelev [et al.] // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing (HoloMAS 2007): Proceedings of the Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (Regensburg, Germany, 03–05 September 2007) / V. Mařík [et al.] (eds.). Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 215–224. DOI: 10.1007/978-3-540-74481-8_21.
24. Solutions // Magenta Technology. URL: <http://magenta-technology.com/category/solutions> (дата обращения: 24.07.2023).
25. FractalAgentsAI. URL: <http://fractalagents.ai> (дата обращения: 26.02.2025).
26. Albato. URL: <http://albato.ru> (дата обращения: 26.02.2025).

27. Загорская К. Р., Иванова И. В. Синергия RPA и искусственного интеллекта // Дневник науки. 2023. № 11 (83). 11 с. DOI: 10.51691/2541-8327_2023_11_8.

28. A Comprehensive Review on Artificial Intelligence (AI) and Robotic Process Automation (RPA) for the Development of Smart Cities / J. K. Ray, R. Sultana, R. Bera [et al.] // Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation / S. Bhattacharyya [et al.] (eds.). Singapore: Springer, 2023. Pp. 289–311. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5_12.

29. Van Tan V., Yi M.-J. A Multi-Agent System Based Approach to Intelligent Process Automation Systems // Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA 2009): Proceedings of the 12th International Conference (Nagoya, Japan, 14–16 December 2009) / J.-J. Yang [et al.] (eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. Pp. 428–442. DOI: 10.1007/978-3-642-11161-7_30.

Дата поступления: 19.03.2025

Решение о публикации: 02.04.2025

Smart Roads: The Use of Intelligent Systems and Multi-Agent Technologies

- Viktor A. Andrienko¹** — Senior Lecturer, Department of System Programming. Research interests: artificial intelligence, intelligent agents, multi-agent systems, automation of development and quality assurance of complex software products, architecture and design of information systems, digital transformation, intelligent transportation systems. E-mail: winwork@mail.ru
- Vladimir I. Kiyaev²** — PhD in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Computer Science. Research interests: development of complex systems, systems and process approaches, metrology and quality, smart agents and multi-agent systems, digital transformation, hybrid systems. E-mail: kiyaev@mail.ru
- Sofiya A. Kotova²** — 2nd year Master's Degree Student, 09.04.03 Direction of study "Applied computer science". Research interests: artificial intelligence, multi-agent systems, intelligent transportation systems. E-mail: soniakotova2000@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 190034, Russia

²Saint Petersburg State Economic University, 30–32, Griboyedov canal emb., Saint Petersburg, 191023, Russia

For citation: Andrienko V. A., Kiyaev V. I., Kotova S. A. Smart Roads: The Use of Intelligent Systems and Multi-Agent Technologies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 5–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19. (In Russian)

Abstract. An overview of international "smart road" projects is presented and the importance of using artificial intelligence and multi-agent systems for the further development of the road transport system is shown. **Purpose:** to study and analyze the international experience of implementing smart roads projects and their prospects for using multi-agent systems. **Results:** a comparative analysis of the existing projects has demonstrated their diversity and significance and allowed grouping them by scale and focus. Modern practices have demonstrated the effectiveness of artificial intelligence and multi-agent systems in road transport management. **Practical significance:** digitalization and intellectualization of the road transport system in order to increase traffic efficiency and road safety.

Keywords: smart roads, Vehicle-to-Everything, artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent system, robotic process automation, road transport system, logistics, intelligent transport system, road safety, vision zero

REFERENCES

1. Smart Road Book — The Intelligent Road That Runs with Progress. 156 p. Available at: [http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_\(eng\).pdf](http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_(eng).pdf) (accessed: May 20, 2023).

2. Virginia Smart Roads, *Virginia Tech Transportation Institute*. Available at: <http://www.vtti.vt.edu/facilities/virginia-smart-roads.html> (accessed: March 04, 2025).
3. Mobile Monitoring of Selected Elements of Public Space in the Capital City of Prague, *Smart Prague*. Available at: http://smartprague.eu/projects/mobile_monitoring_of_selected_elements_of_public_space_in_the_capital_city_of_prague (accessed: 10.06.2023).
4. Smartroad Gotland. Available at: <http://www.smartroadgotland.com> (accessed: May 20, 2023).
5. Alonso T. Recovering Energy from Traffic: Positive Energy Roads, *Tomorrow.City*. Published online November 27, 2020. Available at: <https://tomorrow.city/a/recovering-energy-from-traffic-positive-energy-roads> (accessed: March 04, 2025).
6. Pérez de Lema M. Nuevas Formas de Generación, *Energética XXI*, 2014, No. 146, Pp. 84–86. (In Spanish)
7. Martínez Euklidiadas M. Smart Tunnel: What Is It, How Does It Work and the Real Example of Malaysia, *Tomorrow.City*. Published online July 16, 2021. Available at: <http://tomorrow.city/smart-tunnel> (accessed: March 04, 2025).
8. Now in China, Smart Roads That Talk to Driverless Cars, *NTDV World*. Published online January 14, 2021. Available at: <http://www.ndtv.com/world-news/chinas-huawei-develops-smart-roads-that-talk-to-driverless-cars-2352262> (accessed: March 04, 2025).
9. V prazhskikh tramvayakh poyavitsya avtopilot [Prague trams to have autopilot], *Vinegret*. Published online April 14, 2016. Available at: <http://www.vinegret.cz/29676/v-prazhskih-tramvayah-poyavitsya-avtopilot> (accessed: August 19, 2023). (In Russian)
10. Solar Roadways. Available at: <http://solarroadways.com> (accessed: May 20, 2023).
11. 5 Top Smart Road Solutions impacting Smart Cities, *StartUs Insights*. Available at: <http://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-smart-road-solutions-impacting-smart-cities> (accessed: May 20, 2023).
12. Tsentralnaya koltsevaya avtomobilnaya doroga [Central Ring Road]. Available at: <http://centralroad.ru> (accessed: May 20, 2023). (In Russian)
13. Menshe probok, vyshe bezopasnost: kak v Rossii vnedryaetsya V2X [Fewer traffic jams, more safety: how V2X is being implemented in Russia], *NTI Platform*. Published online September 26, 2022. Available at: <http://vc.ru/transport/508506-menshe-probok-vyshe-bezopasnost-kak-v-rossii-vnedryaetsya-v2x> (accessed: May 20, 2023). (In Russian)
14. 10 trendov iskusstvennogo intellekta 2024 [10 Artificial Intelligence Trends 2024]. FinTech Association, 2024, 45 p. Available at: http://cifrastroy.ru/uploads/files/10_Trendov_II.PDF (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
15. Alibekov B. I., Mamaev E. A. Multiagentnye sistemy v logistike: informatsionno-analiticheskie aspekty [Multi-Agent Systems of Logistics: Information and Analytical Aspects], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennyye nauki [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences]*, 2017, Vol. 32. Iss. 4, Pp. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62. (In Russian)
16. Morozova Yu. A. Multiagentnye sistemy v logistike: analiz opyta i perspektivy [Multi-agent systems in logistics: analysis of experience and prospects], *Logistika i upravlenie tsepyami postavok [Logistics and Supply Chain Management]*, 2015, No. 2 (67), Pp. 69–76. (In Russian)
17. GOST R 59277—2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikatsiya sistem iskusstvennogo intellekta [GOST R 59277—2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems]. Effective from March 01, 2021. Moscow, StandartInform Publishing House, 2021, 15 p. (In Russian)
18. Gurevich L. A., Vakhitov A. N. Multiagentnye sistemy [Multi-Agent Systems], *Vvedenie v Computer Science: otkrytyy studencheskiy seminar [Introduction to Computer Science: An Open Student Seminar]*, Saint Petersburg, Russia, December 2004–May 2005. Available at: http://masters.donntu.ru/2012/fknt/stropalov/library/pdf/multiagent_system.pdf (accessed: March 17, 2025). (In Russian)
19. Kokaev A. E., Sushchenya R. V. Oblasti primeneniya i platformy dlya razrabotki multiagentnykh sistem. Svoystva multiagentnykh sistem [Areas of Application and Platforms for the Development of Multi-Agent Systems. Properties of Multi-Agent Systems], *Vestnik Nauki*, 2023, No. 7 (64), Vol. 5, Pp. 219–222. (In Russian)

20. Amelin K. S., Amelina N. O., Granichin O. N., Kiyayev V. I. Razrabotka prilozheniy dlya mobilnykh intellektualnykh sistem na platforme Intel Atom: uchebnoe posobie [Developing Applications for Mobile Intelligent Systems on the Intel Atom Platform: A Tutorial]. Moscow, INTUIT, 2016, 201 p. (In Russian)
21. Nwana H. S. Software Agents: An Overview, *Knowledge Engineering Review*, 1996, Vol. 11, No. 3, Pp. 205–244. DOI: 10.1017/S026988890000789X.
22. Kiyayev V. I., Diatlov K. A. Ispolzovanie IoT-tekhnologiy dlya monitoringovykh sistem v khozyaystvennoy deyatel'nosti [Use of IoT Technologies for Monitoring Systems in Economic Activity], *Gipoteza [Hypothesis]*, 2020, No. 2 (11), Pp. 17–25. (In Russian)
23. Andreev M., Rzhavski G., Skobelev P., et al. Adaptive Planning for Supply Chain Networks. In: *Mařík V., et al. (eds.) Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing (HoloMAS 2007): Proceedings of the Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, Regensburg, Germany, September 03–05, 2007*. Heidelberg, Springer, 2007, Pp. 215–224. DOI: 10.1007/978-3-540-74481-8_21.
24. Solutions, *Magenta Technology*. Available at: <http://magenta-technology.com/category/solutions> (accessed: July 24, 2023).
25. FractalAgentsAI. Available at: <http://fractalagents.ai> (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
26. Albato. Available at: <http://albato.ru> (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
27. Zagorskaya K. R., Ivanova I. V. Sinergiya RPA i iskusstvennogo intellekta [Synergy of RPA and Artificial Intelligence], *Dnevnik Nauki*, 2023, No. 11(83), 11 p. DOI: 10.51691/2541-8327_2023_11_8. (In Russian).
28. Ray J. K., Sultana R., Bera R., et al. A Comprehensive Review on Artificial Intelligence (AI) and Robotic Process Automation (RPA) for the Development of Smart Cities. In: *Bhattacharyya S., et al. (eds.) Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation*. Singapore, Springer, 2023, Pp. 289–311. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5_12.
29. Van Tan V., Yi M.-J. A Multi-Agent System Based Approach to Intelligent Process Automation Systems. In: *Yang J.-J., et al. (eds.) Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA 2009): Proceedings of the 12th International Conference, Nagoya, Japan, December 14–16, 2009*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, Pp. 428–442. DOI: 10.1007/978-3-642-11161-7_30.

Received: 19.03.2025

Accepted: 02.04.2025

УДК 621.3.027

Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности

Бараусов Виктор Александрович — исполнительный директор. Научные интересы: интеллектуальные системы обогрева. E-mail: barausovv@gmail.com

Группа Компаний ИМСАТ, Россия, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, д. 7, лит. А

Для цитирования: Бараусов В. А. Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 20–28. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-20-28

Аннотация. Представлена имитационная модель способа определения толщины льда на контактных проводах железных дорог. Способ основан на асинхронном нагреве двух чувствительных элементов (ЧЭ) с разницей времени включения. Определение толщины льда выполняется на основе анализа длительности фазового перехода льда в воду. **Методы:** построен на классической теории теплопроводности, используемой для построения уравнения теплопередачи. Реализована программная модель в среде MATLAB, проведены расчеты зависимости времени плавления от мощности нагревателей и температуры окружающей среды. Представлены результаты моделирования, научная новизна метода и его практическое применение. **Цель:** разработка имитационной модели способа асинхронного определения толщины льда на поверхности контактных проводов, позволяющей: количественно определять толщину наледи; учитывать влияние внешних факторов (температуры окружающей среды, мощности нагревателей); создать программную реализацию модели и провести ее верификацию на численных экспериментах. **Практическая значимость:** программа позволяет проводить имитационное моделирование работы датчика для обнаружения льда или снега на контролируемой поверхности, что открывает возможности для решения ряда научных и практических задач.

Ключевые слова: имитационная модель, асинхронный способ, определение толщины льда, контактный провод, фазовый переход

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Актуальность исследования

Разработан способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения [1]. Технические решения данного патента могут найти применение при построении мониторинга толщины льда на контактном проводе железных дорог. Обледенение контактных проводов железных дорог представляет серьезную проблему в странах с холодным климатом. Согласно исследованиям [2], наледь на контактных проводах приводит к ухудшению их электропроводности, механическим повреждениям, возникновению электрических дуг,

нарушению стабильности энергоснабжения и обрывам. Существующие методы борьбы с обледенением включают механическую очистку, нагрев проводов и использование химических реагентов. Однако они обладают рядом недостатков: требуют больших энергозатрат, сложны в автоматизации или вызывают экологические проблемы.

В связи с этим разработка новых способов мониторинга и предотвращения обледенения, основанных на точном измерении толщины льда в реальном времени, является актуальной задачей.

Предложенный в патенте [1] способ позволяет оперативно определять степень обледенения, что может значительно повысить эффективность противообледенительных мероприятий, минимизировать энергозатраты и снизить риск повреждения инфраструктуры.

Научные задачи

1. Разработка имитационной модели асинхронного способа определения толщины льда

В статье представлена модель, основанная на классической теории теплопроводности, которая описывает процессы нагрева и фазового перехода льда в воду.

Используются численные методы (метод конечных разностей) для решения уравнений теплопередачи, что позволяет точно моделировать динамику температуры на поверхности датчика.

2. Исследование тепловых процессов и фазовых переходов

Модель позволяет анализировать, как энергия распределяется между нагревом льда, его плавлением и последующим фазовым переходом.

Учитываются такие параметры, как мощность нагревателей, температура окружающей среды и свойства материалов (теплоемкость, теплопроводность).

3. Оптимизация параметров работы датчика

Проведено исследование влияния времени задержки включения второго нагревателя (Δt) и мощности нагрева на характеристики температурных кривых.

Разработаны алгоритмы компенсации внешних воздействий (шум, колебания температуры) для повышения точности измерений.

Практические задачи

1. Создание программной реализации модели

Модель реализована в среде MATLAB, что позволяет проводить имитационное моделирование в различных условиях.

Программный код включает динамическое моделирование температуры чувствительных элементов и анализ влияния метеорологических факторов (тип осадков, температура окружающей среды).

2. Применение в системах мониторинга обледенения

Модель может быть использована для разработки датчиков обледенения на железных дорогах, в авиации и других областях, где важно предотвращать образование льда.

Позволяет тестировать и оптимизировать прототипы датчиков до их внедрения в реальные системы.

3. Поддержка принятия решений

На основе анализа графиков температуры и их разностей модель помогает принимать решения о необходимости активации систем обогрева или других мер по предотвращению обледенения.

Снижает энергозатраты за счет предотвращения ложных срабатываний и оптимизации работы систем.

Описание способа

Способ основан на принципах, описанных в патенте [1]. Он использует два чувствительных элемента (ЧЭ), разнесенных на минимальное расстояние. Первый ЧЭ начинает нагреваться сразу, а второй — с задержкой Δt . Разностная схема измерений фиксирует временной интервал, в течение которого оба датчика находятся при температуре 0°C (фазовый переход льда в воду).

Формула расчета толщины льда

Формула расчета толщины льда построена на тепловом балансе и фазовом переходе (плавлении льда). В ее основе учтены следующие исходные данные (табл. 1) и параметры (табл. 2).

Таблица 1

Исходные данные

Параметр	Значение
Площадь поверхности (S)	$0,01 \text{ м}^2$
Плотность льда (ρ)	917 кг/м^3
Удельная теплота плавления (λ)	$335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
Мощность нагревателя (W)	50 Вт
Задержка включения (Δt)	5 с
Фактическая толщина наледи (h_{actual})	$0,005 \text{ м}$
Начальная температура (T_{init})	-5°C
Шаг интегрирования (dt)	1 с

Таблица 2

Расчет основных параметров

Параметр	Формула	Расчет	Результат
Объем льда на пластине (V)	$V = h_{actual} S$	$0,005 \text{ м} \cdot 0,01 \text{ м}^2$	$5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
Масса льда (m)	$m = \rho V$	$917 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	$\approx 0,04585 \text{ кг}$
Энергия плавления (Q_{melt})	$Q_{melt} = m \lambda$	$0,04585 \text{ кг} \cdot 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$	$\approx 15360 \text{ Дж}$
Длительность фазового перехода (Δt_{ϕ})	$\Delta t_{\phi} = Q_{melt} / W$	$15360 \text{ Дж} / 50 \text{ Вт}$	$\approx 307,2 \text{ с}$

Расчет времени для нагрева до температуры плавления

- энергия для нагрева от -5 до 0 °C:

$$Q_{heat} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,004585 \cdot 2100 \cdot 5 \approx 481,25 \text{ Дж};$$

- время для нагрева:

$$t_{heat} = \frac{Q_{heat}}{W} = \frac{481,25}{50} \approx 9,63 \text{ с}.$$

Моделирование работы двух датчиков ЧЭ

Моменты начала плавления:

ЧЭ 1:

Нагрев: $t = 0$ с. Плавление: $t_{melt1} = t_{heat} \approx 9,63$ с.

ЧЭ 2:

Нагрев: $t = 5$ с. Плавление: $t_{melt2} = 5 + t_{heat} \approx 14,63$ с.

Длительность фазового перехода:

Время плавления: $\Delta t_{\phi} = Q_{melt} / W \approx 307,2$ с.

Моменты завершения плавления:

ЧЭ 1: $t_{end1} = t_{melt1} + \Delta t_{\phi} \approx 316,83$ с.

ЧЭ 2: $t_{end2} = t_{melt2} + \Delta t_{\phi} \approx 321,83$ с.

Длительность общего плато:

$\Delta t_{общ} = t_{end1} - t_{melt2} \approx 302,2$ с.

Оценка толщины наледи:

$$h_{est} = \frac{W (\Delta t_{общ} + \Delta t)}{S \cdot \rho \cdot \lambda} \approx 0,005 \text{ м}.$$

Блочная схема имитационной модели

Для реализации предложенных способов обнаружения обледенения (снега/льда) необходимо определить структурное построение алгоритмов (рис. 1), функции программы контроля и разработать имитационную модель информационно-управляющей программы контроля состояния устройства обнаружения обледенения (снега/льда)

стрелочных переводов, способной выполнять полученные команды управления.

Программная реализация

Методология моделирования

Теоретическая база моделирования теплопередачи построена на классической теории теплопроводности, используемой для построения уравнения теплопередачи, современном справочнике по теплопроводности, содержащем методы численного решения уравнений, и основном учебнике по теплообмену, используемом для расчета коэффициентов теплопроводности материалов [3]. Численные методы расчета строились с использованием методов конечных разностей и их применения к задачам теплопроводности и моделирования процессов тепло- и массообмена, а также с алгоритмами численных методов [4, 5]. Механизмы фазовых переходов и процессы обледенения учитывали влияние температуры на структуру материала и материалы по расчету образования льда [5, 6].

Программный код на MATLAB

Программный код реализует динамическое моделирование температуры ЧЭ во времени и асинхронном включении (рис. 2). Для оценки функционирования датчика обледенения в реальных метеоусловиях и метода обнаружения обледенения на рабочей поверхности разработана и исследована компьютерная имитационная модель в среде MATLAB. Она позволяет произвести анализ протекающих тепловых процессов в системе и оценить влияние различных метеорологических условий на процесс обледенения. Модель учитывает такие параметры, как температура окружающей

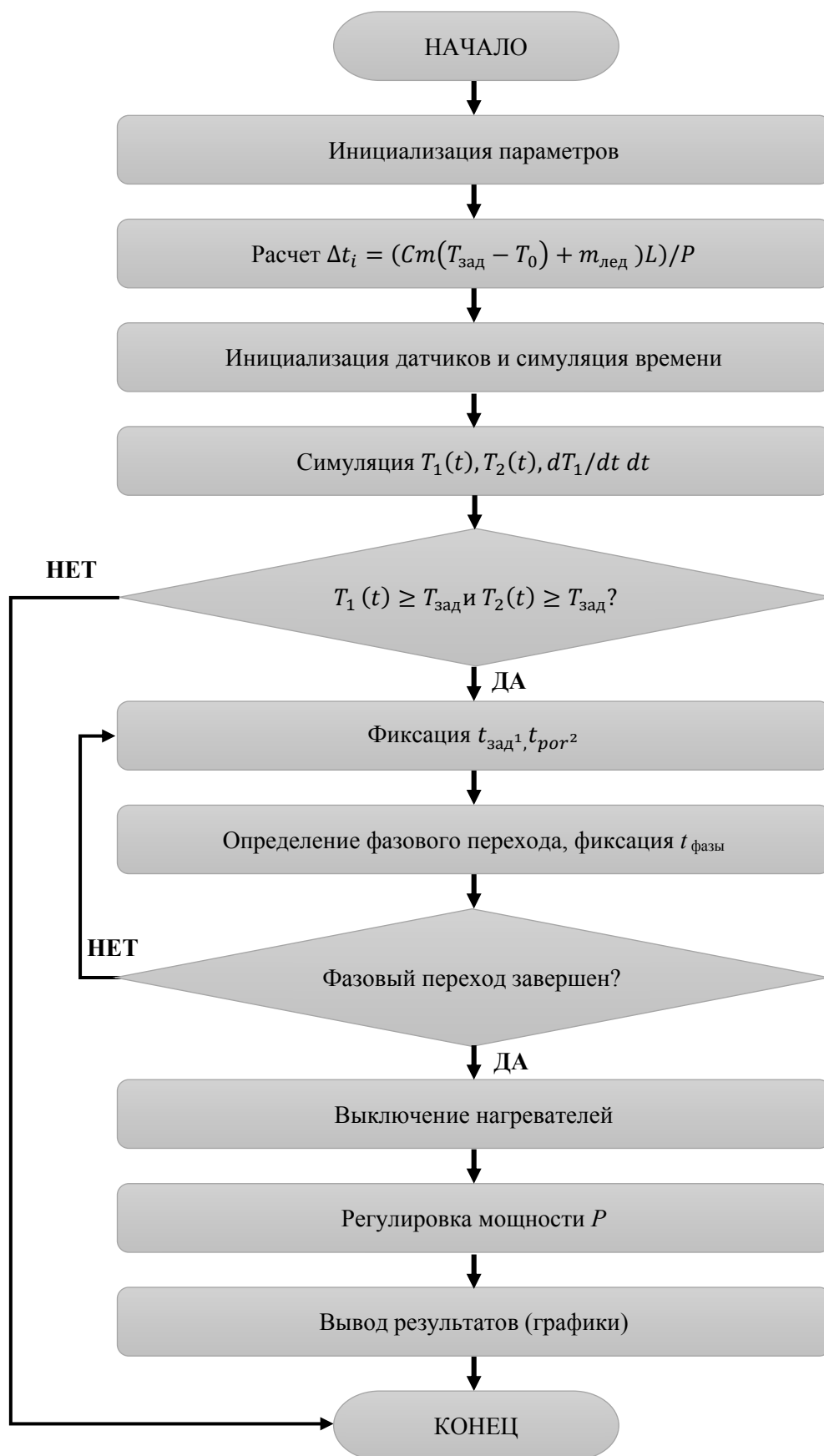


Рис. 1. Блок-схема алгоритмов

```

% Инициализация глобальных параметров
global W_sum rho L A dt threshold_deltaT max_thickness delta_t delta_t_phase;
W = 50; % Мощность одного нагревателя (Вт)
W_sum = 2 * W; % Суммарная мощность двух нагревателей (Вт)
rho = 917; % Плотность льда (кг/м³)
L = 335e3; % Удельная теплота плавления льда (Дж/кг)
A = 0.01; % Площадь поверхности (м²)
dt = 1; % Шаг времени (с)
threshold_deltaT = 2; % Пороговое значение разности температур (°C)
max_thickness = 0.05; % Максимальная допустимая толщина льда (м)
delta_t = 5; % Задержка включения второго нагревателя (с)
delta_t_phase = 307.2; % Продолжительность фазового перехода (с, из расчётов)

% Основной цикл
disp('Запуск системы электрообогрева...');

% 1. Сбор данных
[data] = collectData();
T1 = data.T1;
T2 = data.T2;
T_D0 = data.T_D0;
deltaT = data.deltaT;
t1_on = data.t1_on;
t2_on = data.t2_on;
t_current = data.t_current;

% 2. Обработка данных
[processedData] = processData(T1, T2, T_D0, deltaT, t1_on, t2_on, t_current);
T1_filtered = processedData.T1_filtered;
T2_filtered = processedData.T2_filtered;
t_phase = processedData.t_phase;

% 3. Оценка толщины льда
[h] = estimateIceThickness(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, t1_on, t2_on);

% 4. Логирование
logData(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, h);

% 5. Управление системой
[systemStatus] = manageSystem(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, h);

disp('Система завершена. Статус:');
disp(systemStatus);

```

Рис. 2. MATLAB-код

среды, тип осадков и тепловые характеристики рабочей поверхности. Это позволяет имитировать реальные условия эксплуатации датчика обледенения и проверить его работоспособность в различных сценариях [7].

Графики результатов

Ниже приведены графики результатов моделирования (рис. 3–6).

График на рис. 3 показывает, что с увеличением мощности процесс плавления ускоряется.

Графики температур (рис. 4 и 5) подтверждают, что фазовый переход приводит к нулевому плато температуры.

Результаты моделирования (рис. 6) показывают, что при более низкой температуре требуется больше времени для достижения 0 °C перед фазовым переходом.

Заключение

Данная имитационная модель и ее программная реализация позволяют решать широкий спектр научных и практических вопросов, связанных с тепловыми процессами и фазовыми переходами в ледовом материале [6]. Среди них можно выделить следующие:

1. Анализ энергетического баланса и динамики фазового перехода

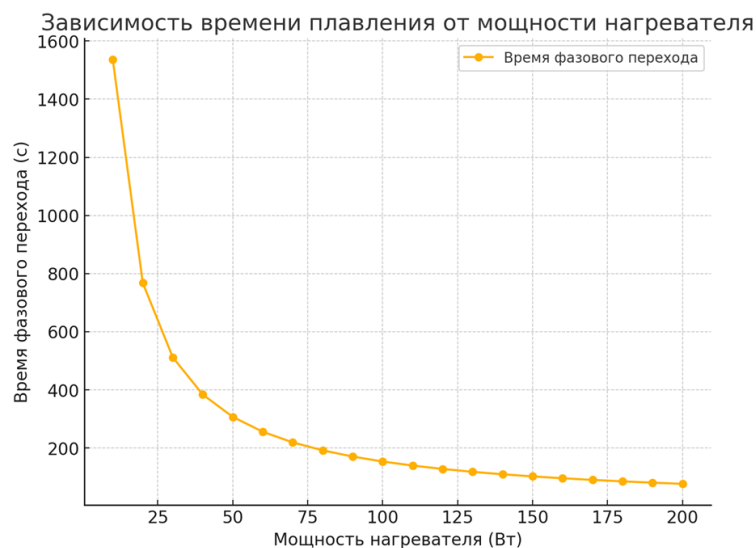


Рис. 3. Зависимость времени плавления от мощности нагревателя

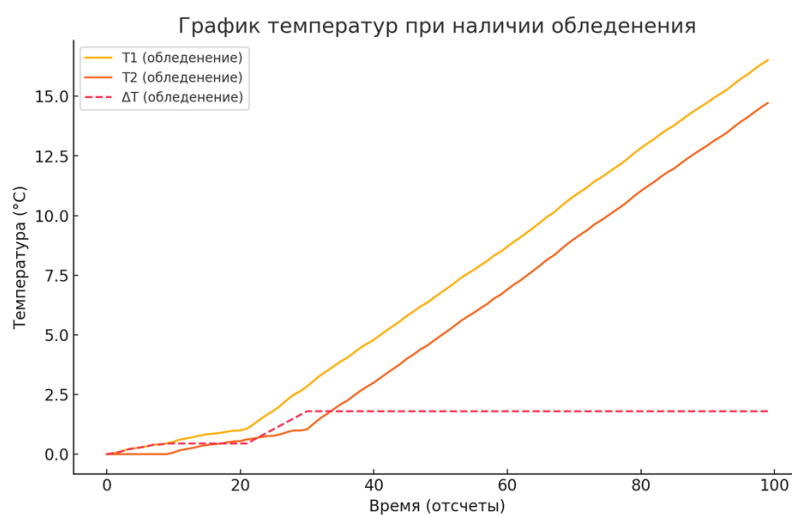


Рис. 4. Зависимость температуры ЧЭ от времени

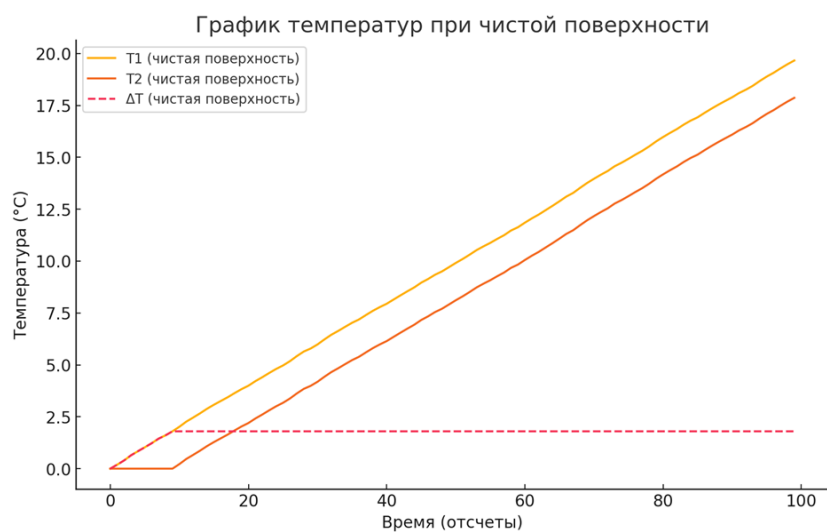


Рис. 5. График температур при чистой поверхности

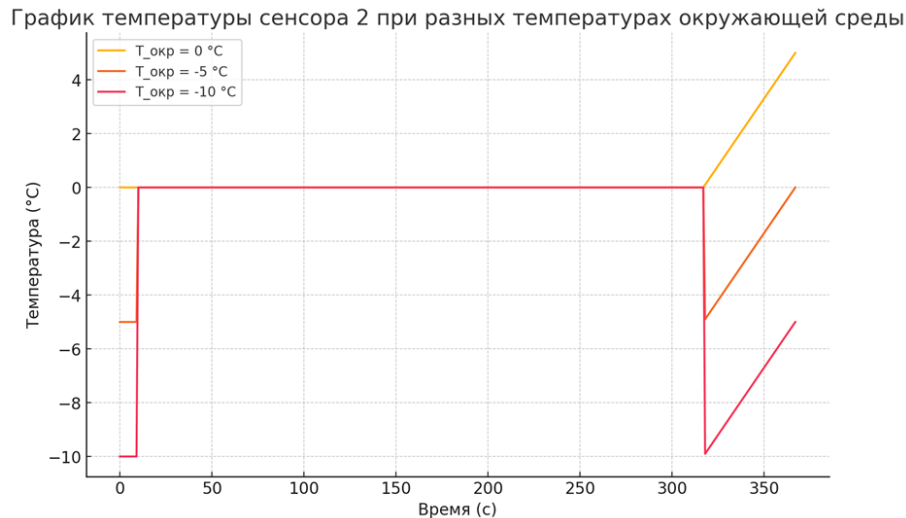


Рис. 6. Влияние температуры окружающей среды

Модель позволяет исследовать, как подводимая энергия распределяется между нагревом льда, его нагревом до температуры плавления и последующим фазовым переходом (накопление энергии на плавление). Это помогает понять и оптимизировать процессы, связанные с управлением температурными режимами и расчетом требуемой энергии для конкретных фазовых изменений.

2. Оптимизация систем обогрева/охлаждения

При использовании в инженерных и технологических приложениях (например, в холодильных установках, системах криоконсервирования или в процессах создания искусственного льда) модель позволяет оценить, как изменение мощности нагревателей (W_1 , W_2) и условия окружающей среды (например, конвективные и радиационные потери) влияют на скорость нагрева и образования ледового слоя. Это может помочь оптимизировать энергопотребление и параметры системы.

3. Прогнозирование образования или таяния льда

В метеорологии, климатологии или гидрологии модель может быть использована для прогнозирования динамики формирования и таяния ледового покрова, что важно для оценки влияния климатических изменений и разработки адаптационных мер.

4. Исследование влияния температурной зависимости физических свойств

Включение температурных поправок для теплоемкости и коэффициента теплопроводности

позволяет анализировать, как изменяются свойства льда вблизи точки фазового перехода и как это отражается на динамике процесса плавления или кристаллизации [6].

5. Моделирование сложных тепловых процессов в материалах

Программная реализация может служить базой для разработки более сложных моделей, учитывающих не только фазовый переход, но и другие механизмы теплообмена (например, влияние конвекции, радиационных эффектов, взаимодействие многослойных структур). Это актуально для материаловедения и инженерных расчетов при проектировании теплоизоляционных или фазово-переходных материалов.

6. Обучение и научно-исследовательская деятельность

Модель предоставляет наглядный пример применения численных методов для решения нелинейных задач теплообмена и фазовых переходов, что полезно для студентов, аспирантов и инженеров, занимающихся моделированием термических процессов.

Таким образом, имитационная модель позволяет не только проводить фундаментальные исследования в области термодинамики и физики фазовых переходов, но и применять полученные результаты для оптимизации практических систем в промышленности, энергетике, климатологии и других областях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2763473 Российская Федерация, МПК В64D 15/20 (2006.01), E01B 7/24(2006.01), E01B 19/00(2006.01), E01H 8/08(2006.01). Способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения: № 2021115157: заявл. 26.05.2021: опубл. 29.12.2021 / Бараусов В. А., Григорьев П. В., Семенов А. Г.; заявители Бараусов В. А., Григорьев П. В. 21 с.
2. Heyun L., Xiaosong G., Wenbin T. Icing and Anti-Icing of Railway Contact Wires // Reliability and Safety in Railway / X. Perpiñà (ed.). Rijeka: Intech Open, 2019. Pp. 295–314. DOI: 10.5772/37141.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности: учебное пособие для студентов теплотехнических специальностей высших учебных заведений. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
4. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh (ed.). Dordrecht: Springer, 2008. 397 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4.
5. Шилин А. Н., Дементьев С. С. Повышение надежности функционирования воздушных линий электропередачи в гололедный период: монография. Старый Оскол: Тонкие Наукоемкие Технологии, 2023. 180 с.
6. Дерюгин В. В., Васильев В. Ф., Уляшева В. М. Тепломассообмен: учебное пособие. 6-е изд., стер. СПб.: Лань, 2023. 240 с.
7. Moler C. B. Numerical Computing with MATLAB. Revised Reprint. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. 348 p.

Дата поступления: 13.05.2025

Решение о публикации: 16.05.2025

Simulation Model of an Asynchronous Method for Determining the Thickness of Ice on a Controlled Surface

Viktor A. Barausov — Executive Director. Research interests: intelligent heating systems.
E-mail: barausovv@gmail.com

IMSAT Group LLC, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Barausov V. A. Simulation Model of an Asynchronous Method for Determining the Thickness of Ice on a Controlled Surface. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 20–28. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-20-28. (In Russian)

Abstract. *The following paper sets out a simulation model of the method of ice thickness measurement on railway contact wires. The method is based on the asynchronous heating of two sensitive elements (SE) with a time difference between the switching on of each element. The determination of ice thickness is achieved through the analysis of the duration of the phase transition of ice into water. **Methods:** the classical theory of thermal conductivity was used in the construction of the heat transfer equation. A software model was implemented in the MATLAB environment, and calculations were performed of the dependence of melting time on heater power and ambient temperature. The paper presents the results of the modelling, the scientific novelty of the method and its practical application. **Purpose:** to develop a simulation model of a method for asynchronously determining the thickness of ice on the surface of contact wires. This methodology enables the calculation of ice thickness, incorporating the impact of external factors such as ambient temperature and heater power. The approach involves the development of a software model and the validation of this model through numerical experimentation. **Practical significance:** the utilization of simulation software facilitates the modelled operation of a sensor designed for the detection of ice or snow on a controlled surface, thereby offering the potential to address numerous scientific and practical issues.*

Keywords: *simulation model, asynchronous method, ice thickness determination, contact wire, phase transition*

REFERENCES

1. Barausov V. A., Grigorev P. V., Semenov A. G. Sposob i ustroystvo opredeleniya tolshchiny lda na rabochey poverkhnosti datchika obledeneniya [Method and Device for Determining Ice Thickness on the Working Surface of Ice-Formation Sensor], patent RU No. 2763473, published at December 29, 2021, 21 p. (In Russian)
2. Heyun L., Xiaosong G., Wenbin T. Icing and Anti-Icing of Railway Contact Wires. In: *Perpiñà X. (ed.) Reliability and Safety in Railway*. Rijeka, Intech Open, 2019, Pp. 295–314. DOI: 10.5772/37141.
3. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti: uchebnoe posobie [Theory of thermal conductivity: a tutorial]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing House, 1967, 599 p. (In Russian)
4. Farzaneh M. (ed.) Atmospheric Icing of Power Networks. Dordrecht, Springer, 2008, 397 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4.
5. Shilin A. N., Dementyev S. S. Povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi v gololednyy period: monografiya [Improving the reliability of overhead power lines during icy periods: monograph]. Stary Oskol, Tonkie Naukoemkie Tekhnologii Publishing House, 2023, 180 p. (In Russian)
6. Deryugin V. V., Vasilyev V. F., Ulyasheva V. M. Teplomassoobmen: uchebnoe posobie [Heat and Mass Transfer: a tutorial]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2023, 240 p. (In Russian)
7. Moler C. B. Numerical Computing with MATLAB. Revised Reprint. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008, 348 p.

Received: 13.05.2025

Accepted: 16.05.2025

УДК 621.3:004.032.26

Нейросетевая классификация дефектов печатных плат

- Романов Кирилл Ильич** — студент кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации». Научные интересы: автоматизация технологических процессов. E-mail: kiromanov@ieeras.ru
- Бабаев Азизбек Адахамжанович** — студент кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации». Научные интересы: автоматизация технологических процессов. E-mail: azizkagif@yandex.ru
- Антонычева Ольга Леонидовна** — старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации». Научные интересы: методы машинного обучения. E-mail: o.l.antonycheva@mtuci.ru

Московский технический университет связи и информатики, Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А

Для цитирования: Романов К. И., Бабаев А. А., Антонычева О. Л. Нейросетевая классификация дефектов печатных плат // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 29–41. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-29-41

Аннотация. Рассматривается разработка модели на основе нейросети YOLOv8x для автоматизированного выявления дефектов на печатных платах. **Цель:** обучение нейросети, способной эффективно обнаруживать и классифицировать различные виды дефектов на печатных платах. **Методы:** использовался метод глубокого обучения, основанный на архитектуре YOLOv8x, предназначенной для задач детектирования объектов. Для оценки эффективности модели проводился анализ метрик точности и потерь. **Результаты:** показывают, что обученная модель демонстрирует высокую точность в классификации дефектов, таких как незапаянное посадочное место (*missing_hole*), короткое замыкание (*short*) и ложная печатная дорожка (*spurious_copper*), достигая точности 1,0. Классы «разомкнутая печатная дорожка» (*open_circuit*) и «выступ меди» (*spur*) также показывают удовлетворительные результаты, однако класс «нарушение целостности печатной дорожки» (*mouse_bite*) требует дальнейшего улучшения. **Практическая значимость:** заключается в возможности применения разработанной модели для автоматизации процессов контроля качества печатных плат, что может значительно повысить надежность электронных изделий и снизить вероятность отказов в критически важных системах.

Ключевые слова: печатная плата, дефекты, нейросетевая классификация, нейросетевая модель YOLOv8x

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

Современные электронные изделия создаются на основе печатного монтажа, представляющего собой многослойную структуру из диэлектрика и проводящего слоя. Надежность таких изделий особенно критична в космической, авиационной и военной отраслях, где эксплуатация проходит в

жестких условиях. До 40 % отказов электронных средств (ЭС) связано с дефектами печатных плат (ПП), возникающими из-за нарушений технологии производства [1].

Для обнаружения дефектов ПП используют информационно-измерительные системы (ИИС), кото-

рые обеспечивают контроль на всех этапах производства. Среди методов контроля широко применяются оптический, рентгеновский, электрический и тепловой. Наиболее экономичным и быстрым является оптический метод, который позволяет выявлять дефекты как ПП, так и печатных узлов. Однако ручной контроль имеет высокую вероятность пропуска дефектов, что требует автоматизации анализа [2].

Внедрение нейросетевых технологий в контроль качества ПП открывает новые возможности для повышения точности диагностики. Нейросети, обученные на данных о дефектах, способны автоматически выявлять и классифицировать недостатки, сокращая время и снижая затраты. Обработка данных в реальном времени позволяет предотвратить попадание бракованных плат в продукцию, что снижает издержки на доработку и замену [3].

Нейросети, принцип работы, применение

Нейронная сеть — это программа, имитирующая работу естественной нейронной сети мозга для решения задач и машинного обучения.

Знания в нейронной сети распределены между ее элементами (искусственными нейронами) через связи с адаптивными весами. Сеть обучается, регулируя веса соединений между нейронами, сгруппированными в слои. Входной слой получает информацию, выходной передает ответ, а скрытые слои обрабатывают данные. Выход зависит от весов связей: если сумма взвешенных входных сигналов превышает порог, нейрон отправляет сигнал дальше [4].

Нейросети находят широкое применение в различных областях благодаря своей способности обрабатывать большие объемы данных и выявлять сложные закономерности [5].

В производстве возобновляемой энергии, включая оценку, обслуживание и управление, применение искусственного интеллекта и нейронных сетей позволит улучшить все аспекты. Цифровизация сектора создаст гибкие и устойчивые энергетические системы, что сделает возобновляемую энергию основным источником электроэнергии [6].

В компьютерном зрении они активно используются для распознавания изображений и видео [7, 8], что находит применение в системах безопасно-

сти [9], автономных транспортных средствах [10] и медицинской диагностике [11].

В области обработки естественного языка нейросети применяются для перевода текстов [12], создания чат-ботов [13] и извлечения ключевых слов [14].

Исследования показывают [15], что искусственный интеллект активно используется в финансах, особенно в области финансового прогнозирования, защиты и анализа. Основной технологией является контролируемое обучение, а глубокое обучение стало популярным в последние годы.

В здравоохранении нейросети используются для диагностики заболеваний, прогнозирования эпидемий и персонализированного лечения, анализируя генетические данные и медицинские записи для разработки индивидуальных планов лечения [16–20].

В производственных процессах нейросети активно применяются для улучшения аналитических и предсказательных возможностей систем поддержки принятия решений, что позволяет справляться с растущей сложностью и неопределенностью, обеспечивая более эффективное принятие решений и оптимизацию затрат [21].

С учетом технологического прогресса последних десятилетий, технологии и автоматизация стали важными факторами роста, а применение роботизированной автоматизации процессов и алгоритмов искусственного интеллекта значительно улучшает точность и эффективность технологических процессов [22].

Автоматизация с использованием нейросетей уменьшает влияние человеческого фактора, обеспечивая стабильное качество продукции и улучшая производственные процессы [23]. Интеграция нейросетей в контроль дефектов ПП является перспективным направлением для повышения надежности электронных изделий, сокращения затрат и ускорения выхода продукции на рынок.

Используемый датасет

Набор данных печатных плат [24] состоит первоначально из 1386 изображений с 6 видами дефектов: незапаянное посадочное место (*missing_hole*),

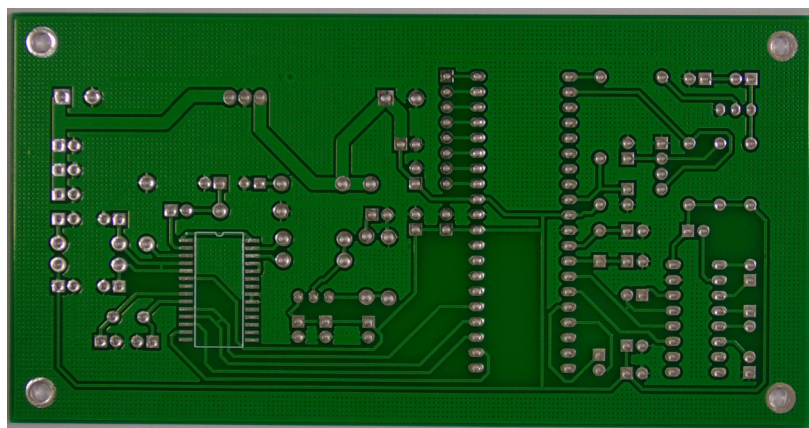


Рис. 1. Пример фотографии из набора данных

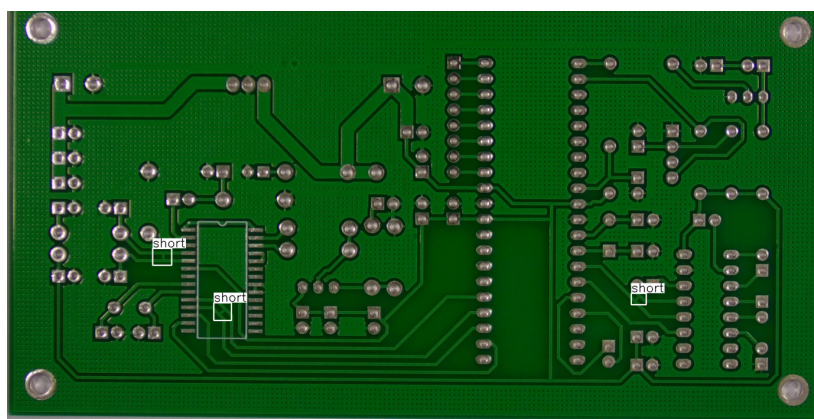


Рис. 2. Пример фотографии из набора данных с использованием информационных рамок

разомкнутая печатная дорожка (open_circuit), короткое замыкание (short), выступ меди (spur), ложная печатная дорожка (spurious_copper), нарушение целостности печатной дорожки (mouse_bite).

Пример фотографии из набора данных приведен на рис. 1.

Для удобства восприятия информации о печатных платах на фотографиях размечены соответствующие области. С использованием функции `cv2.rectangle` отображаются информационные рамки по заранее известным координатам дефектов (рис. 2).

Общее количество фотографий составило 693 (табл. 1). Это обусловлено тем, что половина датасета представляет собой дубликаты, которые были повернуты в диапазоне от -10° до 10° . В исследовании повернутые дубликаты не учитывались.

В работе [25] авторы упоминают о способах повышения качества распознавания. Основное

улучшение качества распознавания изображений обеспечила аугментация, которая увеличила объем обучающей выборки с помощью искажений (масштабирование, сдвиг, отражение, поворот). Кадрирование изображений для обучающей, валидационной и тестовой выборок также повысило точность, исключив избыточную информацию.

Однако цель данной работы состоит в обучении нейросети и возможности распознавания с ее помощью дефектов на печатных платах. Повышение качества распознавания требует дополнительных исследований.

В табл. 1 приведено количество фотографий по каждому типу дефектов, а также выведена информация по количеству дефектов на всех фотографиях, рассчитано среднее количество дефектов на фотографии. Получается, что среднее количество дефектов на фотографии для всего датасета равно 4,25, а медианное значение (среднее из

Таблица 1

Содержание датасета

Название класса	Количество дефектов на всех фотографиях	Количество фотографий	Среднее количество дефектов на фотографии
missing_hole	497	115	4,32
mouse_bite	492	115	4,28
open_circuit	482	116	4,15
short	491	116	4,23
spur	488	115	4,24
spurious_copper	503	116	4,34

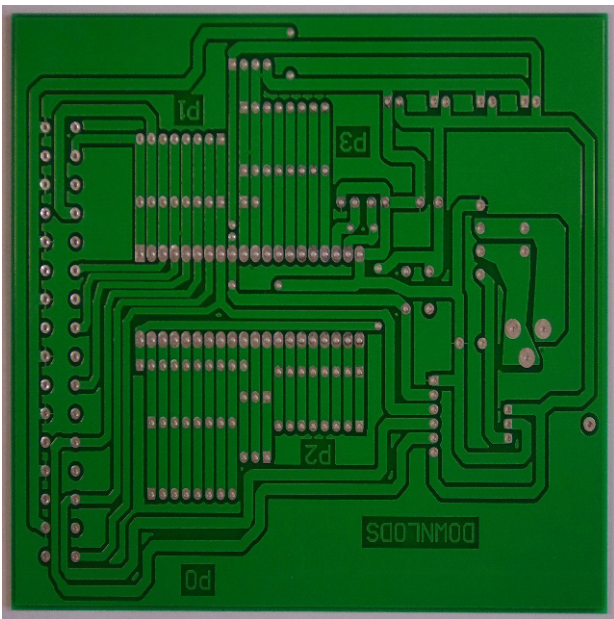


Рис. 3. Файл 04_short_06.jpg

центральных, упорядоченных значений) — 4,26. Близкие значения среднего значения и медианы говорят о равномерном распределении данных без сильных колебаний.

Равномерность данных создает благоприятные условия для обучения модели. Каждый тип дефекта представлен примерно в равных количествах, что позволяет обучаться без предвзятости к каким-либо конкретным классам: модель будет лучше распознавать все типы дефектов, а не только те, которые встречаются чаще.

Равномерное распределение данных также снижает риск переобучения, поскольку модель будет вынуждена учитывать все классы на протяжении всего процесса обучения. Это, в свою очередь, помогает повысить устойчивость к выбро-

сам и аномалиям в данных, что делает обучение более стабильным и предсказуемым. Кроме того, модель, обученная на равномерных данных, будет обладать лучшей обобщающей способностью. Она сможет эффективно применять свои знания к новым, ранее невидимым данным, что является ключевым аспектом успешного применения в реальных задачах. Таким образом, равномерное распределение данных по типам дефектов способствует созданию более эффективной и точной модели распознавания.

Мультискейл-обучение особенно полезно в ситуациях, когда объекты имеют разные размеры, оно подразумевает использование нескольких масштабов входных изображений. Во время обучения изображения случайным образом изменяются по размеру, и модель обучается на пакетах изображений разных масштабов. Модель YOLO обновляется с учетом градиентов, вычисленных на основе функции потерь для каждого масштаба изображения, что позволяет ей эффективно обнаруживать объекты различных размеров [26].

В нашем исследовании изображения приводились к единому размеру: 640 на 640 пикселей (рис. 3). Это связано с необходимостью обеспечить высокую скорость обработки и эффективность алгоритма детекции объектов. Меньшие изображения требуют меньше вычислительных ресурсов, что делает модель способной обрабатывать больше кадров в секунду. Выбранный размер является компромиссом, который позволяет сохранить достаточное количество деталей для точной детекции объектов, а также эффективно справляться с задачей выявления объектов разных размеров.

Таблица 2

Аннотация дефектов на примере файла 04_short_06.jpg

Файл	Ширина	Высота	Класс	x_{min}	y_{min}	x_{max}	y_{max}
04_short_06.jpg	640	640	short	249	142	266	162
04_short_06.jpg	640	640	short	261	61	278	83
04_short_06.jpg	640	640	short	174	226	194	248

В табл. 2 представлена аннотация дефектов на примере файла 04_short_06.jpg.

В данном файле видно три дефекта, каждый из которых описан с указанием координат и класса. После применения функции `resize_annotations` произошли изменения в аннотациях изображения.

DataFrame аннотаций (на примере файла 04_short_06.jpg) содержит следующие характеристики: ширина и высота изображения (640 пикселей), класс дефекта (short). Координаты для каждого дефекта указаны в формате x_{min} , y_{min} , x_{max} , y_{max} , они необходимы для обучения нейросети, а также корректной работы функции `cv2.rectangle`.

Обучение нейросети YOLOv8x

Архитектура YOLO (You Only Look Once) [27] является одной из ключевых разработок в области детекции объектов в реальном времени. Базовая модель YOLO способна обрабатывать изображения в реальном времени со скоростью 45 кадров в секунду, а более компактная версия, Fast YOLO, достигает невероятных 155 кадров в секунду. При этом она демонстрирует в два раза более высокие значения mAP по сравнению с другими системами детекции в реальном времени [28]. Это делает YOLO идеальным выбором для поиска дефектов на печатных платах.

В рамках исследования проведены эксперименты с использованием бесплатной интерактивной облачной среды для работы с кодом на языке Python от Google в браузере Google Colab [29]. В табл. 3 представлены основные параметры обучения нейросети YOLOv8x.

Результаты обучения нейросети YOLOv8x

В процессе обучения модели YOLOv8x мы оценивали ее производительность с помощью не-

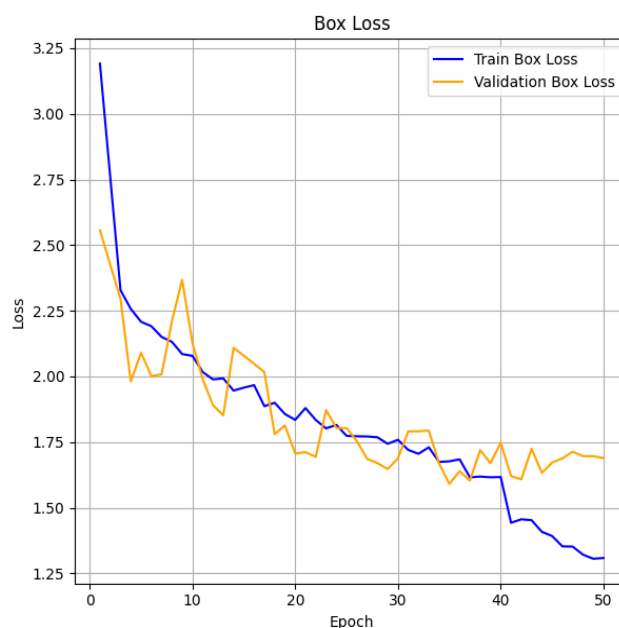


Рис. 4. Метрика обученной нейросети: Box Loss

Таблица 3

Параметры нейросети YOLOv8x

Параметр	Значение
Размер батча	16
Количество эпох	50
Смешивание (mixup)	0,3
Начальная скорость обучения (lr0)	0,001
Конечная скорость обучения (lr1)	0,0001

скольких ключевых метрик: Box Loss, Class Loss и Distribution Focal Loss (рис. 4–6) для обучающей (train) и валидационной (validate) выборки. Эти метрики помогают анализировать качество предсказаний модели в контексте выявления и классификации дефектов.

Box Loss снижается на протяжении всех эпох (рис. 4). Это указывает на то, что модель успешно оптимизировала предсказания ограничивающих рамок для дефектов, улучшая точность локализа-

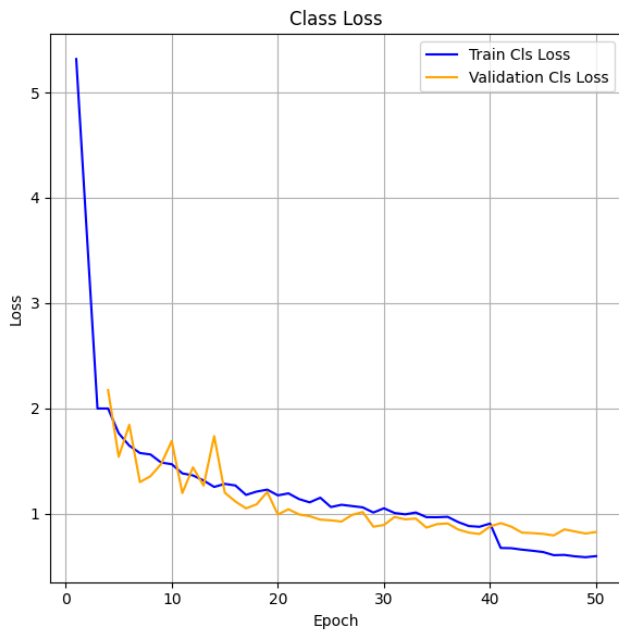


Рис. 5. Метрика обученной нейросети: Class Loss

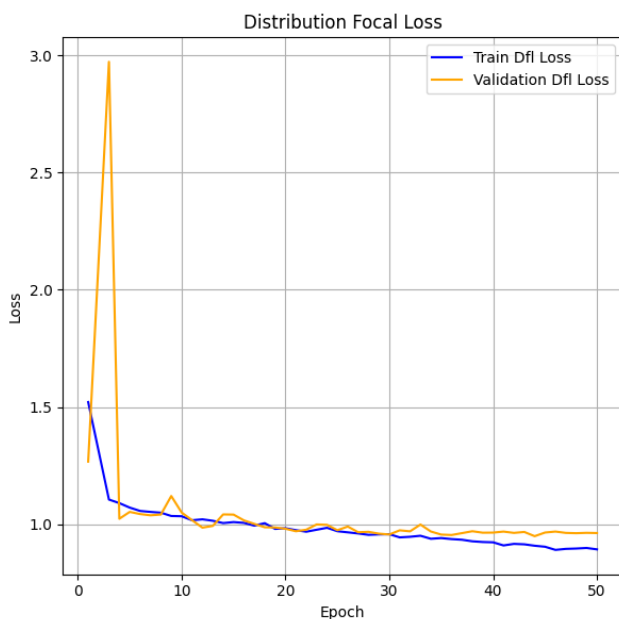


Рис. 6. Метрика обученной нейросети: Distribution Focal Loss

ции (определения местоположения) дефектов на печатных платах. Ситуация, наступившая после 40 эпохи обучения, когда значение Box Loss на обучающей выборке значительно снижается, в то время как на валидационной выборке оно остается на одном уровне и даже имеет тенденцию к незначительному увеличению, может указывать на переобучение модели.

Class Loss показывает стабильное снижение (рис. 5), что говорит о том, что модель улучшает

свои способности к классификации различных типов дефектов. После 40 эпохи Class Loss на обучающей выборке снижается, в то время как на валидационной выборке остается на одном уровне или даже демонстрирует локальные максимумы, это может указывать на переобучение модели.

Distribution Focal Loss демонстрирует тенденцию к снижению на протяжении всех эпох как для обучающей, так и для валидационной выборки (рис. 6). При этом после 35 эпохи обучения данная метрика практически не меняется для валидационной выборки. Это указывает на то, что модель начинает запоминать данные из обучающей выборки, не извлекая общие закономерности, которые могли бы помочь ей на новых данных, и может быть признаком переобучения.

Модель достигла плато в процессе обучения, и текущие параметры могут быть неоптимальными для дальнейшего прогресса. В таких случаях стоит рассмотреть возможность изменения архитектуры модели, использования методов аугментации, изменения скорости обучения или варьирования других гиперпараметров.

Нормализованная матрица классов (рис. 7) позволяет оценить качество работы модели классификации. Она показывает, насколько точно модель распознает различные классы и как часто она путает их друг с другом.

Классы `missing_hole`, `short` и `spurious_copper` имеют полную точность (1,0), в то время как `open_circuit` и `spur` показывают хорошие результаты (0,82 и 0,81). Класс `mouse_bit` имеет низкую точность (0,67), что указывает на трудности в классификации, вероятно, из-за недостатка разнообразия данных.

Метрика F1-Score (рис. 8) — это среднее гармоническое значение точности [30]. При пороге модель показывает наилучшие результаты в сочетании точности и полноты.

Метрика F1-Score имеет максимальные значения для всех классов на плато с 0,1 до 0,7 по оси X (уверенности), это означает, что в этом диапазоне значений уверенности модель показывает стабильные и хорошие результаты по сочетанию точности и полноты.

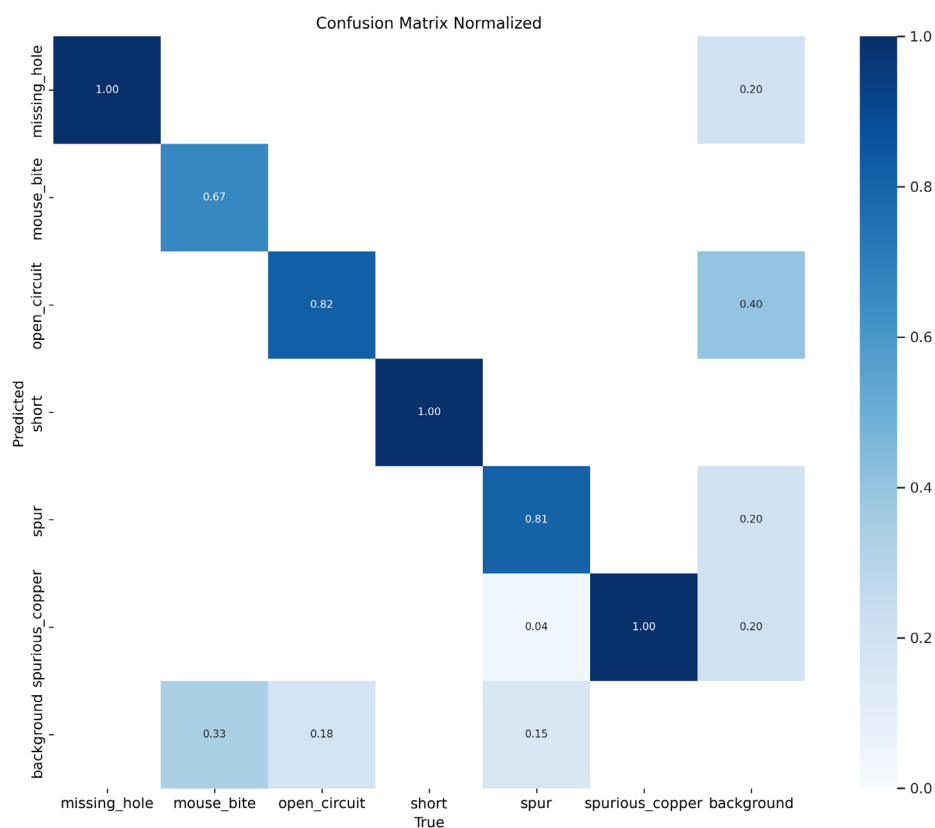


Рис. 7. Нормализованная матрица

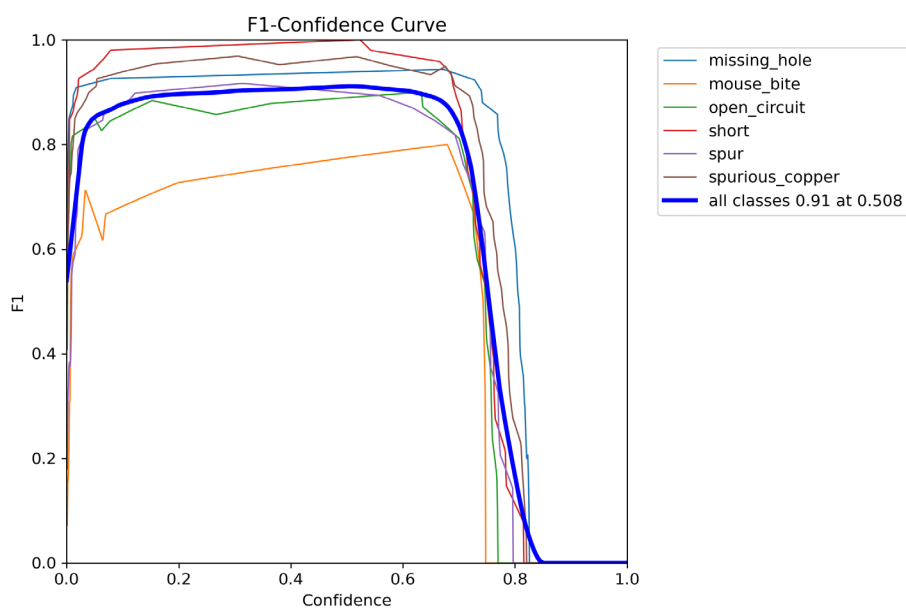


Рис. 8. Метрика F1-Score

Пример распознавания обученной модели

На рис. 9 и 10 представлены результаты работы обученной модели, предназначенной для обнаружения дефектов.

Рядом с типом дефекта указано значение вероятности в круглых скобках. Это значение отражает вероятность, с которой обученная модель предполагает наличие данного дефекта.

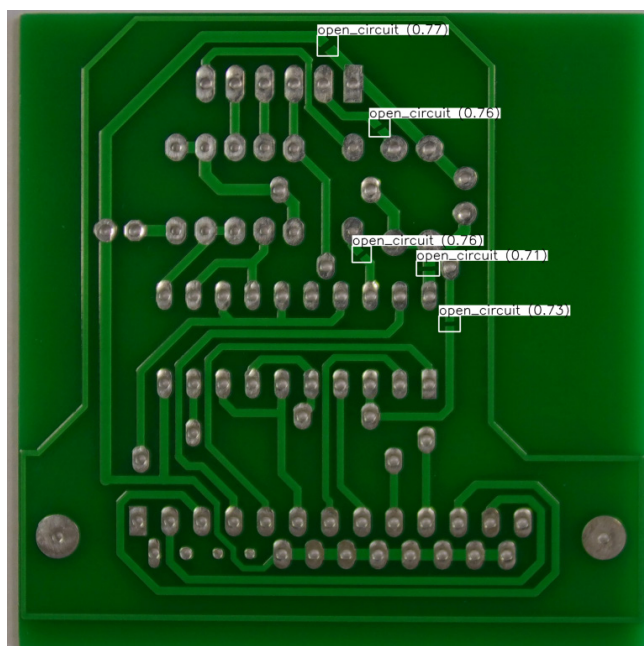


Рис. 9. Пример работы обученной модели с дефектами типа «разомкнутая цепь» (open circuit)

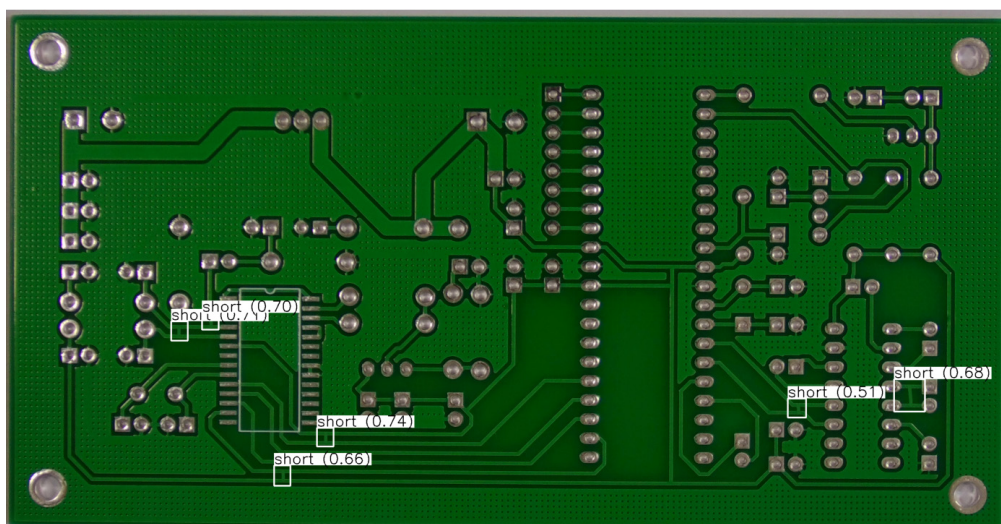


Рис. 10. Пример работы обученной модели с дефектами типа «короткое замыкание» (short)

Заключение

Современные электронные изделия, основанные на печатных платах, требуют высокого уровня надежности, особенно в критически важных отраслях, таких как космическая, авиационная и военная промышленность. Дефекты печатных плат, возникающие из-за нарушений технологических процессов, являются одной из основных причин отказов электронных средств.

Обучение YOLOv8x на специализированном датасете с шестью видами дефектов позволило получить модель, которая демонстрирует полную уверенность в классах missing_hole, short и

spurious_copper, достигая точности 1,0. Классы open_circuit и spur также показывают хорошие результаты с точностью 0,82 и 0,81 соответственно. Однако класс mouse_bit имеет более низкую точность, составившую 0,67.

В процессе обучения модели наблюдается снижение Box Loss и Class Loss, что свидетельствует о прогрессе в локализации и классификации дефектов. Однако после 40 эпохи обучения возникает проблема переобучения, так как значения метрик на валидационной выборке остаются стабильными или даже увеличиваются, что указывает на недостаток обобщающих способ-

ностей модели. В связи с этим для улучшения результатов следует рассмотреть возможность изменения архитектуры модели и оптимизации гиперпараметров. Оптимизация параметров обучения нейросети не является целью

данной работы и требует дополнительных исследований.

Проведенные эксперименты продемонстрировали, что обученная нейросеть YOLOv8x способна эффективно выявлять дефекты печатных плат.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилова Е. А. Классификация дефектов печатных плат // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» (Пенза, Россия, 27 мая — 03 июня 2013 г.): в 2 т. Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2013. Т. 1. С. 325–328.
2. Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2 (18). С. 68–76. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-10.
3. Складнова М. С. Методы контроля печатных плат // Colloquium-journal. 2019. № 25-2 (49). С. 95–97. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10882.
4. Ксенофонов В. В. Нейронные сети // Проблемы науки. 2020. № 11 (59). С. 28–29.
5. Smith R. G., Eckroth J. Building AI Applications: Yesterday, Today, and Tomorrow // AI Magazine. 2017. Vol. 38, No. 1. Pp. 6–22. DOI: 10.1609/aimag.v38i1.2709.
6. Yağcı B. E., Demirsoy G., Akpolat A. N. General Overview of Artificial Neural Network Applications in Renewable Energy Systems // Turkish Journal of Electromechanics and Energy. 2024. Vol. 9, No. 3. Pp. 95–107.
7. Алексеева Н. С. Распознавание лиц по фотографии с помощью нейронных сетей // Международный студенческий научный вестник. 2021. № 1. 5 с. URL: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=20406> (дата обращения: 17.01.2025).
8. Шарипова Д. Д. Нейронная сеть ImageAI: распознавание объектов // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2020. № 2 (11). С. 140–144.
9. Бондаренко В. И., Нестругина Е. С. Система распознавания лиц преступников с помощью камер видеонаблюдения // Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы VII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Донецкого национального университета (Донецк, 27–28 октября 2022 г.). Т. 2. Физические, технические и компьютерные науки / под общ. ред. С. В. Беспаловой. Донецк: Донецкий нац. ун-т, 2022. С. 236–237.
10. Боликов С. С. Машинное зрение и нейронные сети / С. С. Боликов; науч. рук. Е. И. Шишков // Конкурентоспособность территорий: материалы XX Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов (Екатеринбург, Россия, 27–28 апреля 2017 г.): в 8 ч. Ч. 8. Екатеринбург: Уральский гос. экон. ун-т, 2017. С. 21–22.
11. Artificial Intelligence (AI) Applications for COVID-19 Pandemic / R. Vaishya, M. Javaid, I. H. Khan, A. Haleem // Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews. 2020. Vol. 14, Iss. 4. Pp. 337–339. DOI: 10.1016/j.dsx.2020.04.012.
12. The Impact of Artificial Intelligence on Language Translation: A Review / Y. A. Mohamed, A. Khanan, M. Bashir [et al.] // IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 25553–25579. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3366802.
13. Муратова У. Д. Изучение нейронных сетей для чат-ботов / У. Д. Муратова; науч. рук. П. В. Балакшин // Сборник трудов IX Конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 15–18 апреля 2020 г.). Т. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2021. С. 92–95.
14. Алгоритм оптимизации извлечения ключевых слов на основе применения лингвистического парсера / Д. Ю. Кравченко, Ю. А. Кравченко, А. Мансур [и др.] // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 2. С. 467–494. DOI: 10.15622/ia.23.2.6.
15. Artificial Intelligence Applications in Finance: A Survey / X. Li, A. Sigov, L. Ratkin [et al.] // Journal of Management Analytics. 2023. Vol. 10, Iss. 4. Pp. 676–692. DOI: 10.1080/23270012.2023.2244503.

16. Joshi N., Dave T. Improved Accuracy for Heart Disease Diagnosis Using Machine Learning Techniques // Journal of Informatics and Web Engineering. 2025. Vol. 4, No. 1. Pp. 42–52. DOI: 10.33093/jiwe.2025.4.1.4.
17. Datilo P. M., Ismail Z., Dare J. A Review of Epidemic Forecasting Using Artificial Neural Networks // Epidemiology and Health System Journal. 2019. Vol. 6, Iss. 3. Pp. 132–143. DOI: 10.15171/ijer.2019.24.
18. Atan O., Jordon J., van der Schaar M. Deep-Treat: Learning Optimal Personalized Treatments from Observational Data Using Neural Networks // Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (New Orleans, LA, USA, 02–07 February 2018). Palo Alto (CA): AAAI Press, 2018. Pp. 2071–2078. DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11841.
19. Deep Neural Network Provides Personalized Treatment Recommendations for *de novo* Metastatic Breast Cancer Patients / C. Li, Y. Wang, H. Bai [et al.] // Journal of Cancer. 2024. Vol. 15, Iss. 20. Pp. 6668–6685. DOI: 10.7150/jca.101293.
20. Review of Application YOLOv8 in Medical Imaging / A. Widayani, A. M. Putra, A. R. Maghriebe [et al.] // Indonesian Applied Physics Letters. 2024. Vol. 5, No. 1. Pp. 23–33. DOI: 10.20473/iapl.v5i1.57001.
21. Mumali F. Artificial Neural Network-Based Decision Support Systems in Manufacturing Processes: A Systematic Literature Review // Computers and Industrial Engineering. 2022. Vol. 165. Art. No. 107964. 20 p. DOI: 10.1016/j.cie.2022.107964.
22. Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 — A Literature Review / J. Ribeiro, R. Lima, T. Eckhardt, S. Paiva // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 181. Pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.104.
23. Еделев Д. А., Благовещенская М. М., Благовещенский И. Г. Использование нейронных сетей как фактора повышения качества и безопасности производства пищевых продуктов при решении задач автоматизации // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2015. Т. 7, № 1 (21). С. 7–10. DOI: 10.15673/2312-3125.21/2015.42856.
24. Akhatova A. PCB Defects // Kaggle. URL: <http://www.kaggle.com/datasets/akhatova/pcb-defects> (дата обращения: 17.01.2025).
25. Черемисинова О. Н., Ростовцев В. С. Повышение качества распознавания изображений подбором параметров сверточной нейронной сети // Интеграция науки в современном мире: сборник научных работ 52-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (Москва, Россия, июнь 2019 г.). М.: Евразийское Научное Объединение, 2019. С. 114–118.
26. Statistical Analysis of Design Aspects of Various YOLO-Based Deep Learning Models for Object Detection / U. Sirisha, S. P. Praveen, P. N. Srinivasu [et al.] // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2023. Vol. 16. Art. No. 126. 29 p. DOI: 10.1007/s44196-023-00302-w.
27. Ultralytics YOLO. URL: <http://www.ultralytics.com/ru/yolo> (дата обращения: 17.01.2025).
28. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), (Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. Pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
29. Google Colaboratory. URL: <http://colab.google> (дата обращения: 17.01.2025).
30. F1-Score // Ultralytics. URL: <http://www.ultralytics.com/ru/glossary/f1-score> (дата обращения: 17.01.2025).

Дата поступления: 26.03.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Neural Network Classification of Printed Circuit Board Defects

- Kirill I. Romanov** — Student, Department of Intelligent Systems in Management and Automation. Research interests: automation of technological processes. E-mail: kiromanov@ieeras.ru
- Azizbek A. Babaev** — Student, Department of Intelligent Systems in Management and Automation. Research interests: automation of technological processes. E-mail: azizkagif@yandex.ru
- Olga L. Antonycheva** — Senior Lecturer, Department of Intelligent Systems in Management and Automation. Research interests: machine learning. E-mail: o.l.antonycheva@mtuci.ru

Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A, Aviamotornaya str., Moscow, 111024, Russia

For citation: Romanov K. I., Babaev A. A., Antonycheva O. L. Neural Network Classification of Printed Circuit Board Defects. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 29–41. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-29-41. (In Russian)

Abstract. *This study focuses on the development of a model based on the YOLOv8x neural network for the automated detection of defects in printed circuit boards (PCBs). **Purpose:** to train a neural network capable of effectively detecting and classifying various types of PCB defects. **Methods:** a deep learning method based on the YOLOv8x architecture, designed for object detection tasks. An accuracy and loss metrics analysis was conducted to assess the model's effectiveness. **Results:** the trained model demonstrates high accuracy in classifying defects such as missing holes, shorts, and spurious copper, achieving an accuracy of 1.0. The “open circuits” and “copper spurs” classes also yield satisfactory results. However, the “mouse bites” class requires further improvement. **Practical significance:** the potential application of the developed model for automating quality control processes in PCBs could significantly enhance the reliability of electronic devices and reduce the potential failures in critical systems.*

Keywords: printed circuit board, defects, neural network classification, YOLOv8x neural network model

REFERENCES

1. Danilova E. A. Klassifikatsiya defektov pechatnykh plat [Classification of printed circuit board defects], *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost i kachestvo” [Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”]*, Penza, Russia, May 27 — June 03, 2013. Vol. 1. Penza, Penza State University, 2013, Pp. 325–328. (In Russian)
2. Danilova E. A., Kochegarov I. I., Trusov V. A. Modeli tekhnologicheskikh defektov provodyashchego risunka pechatnykh plat [Models of Technological Defects of Conductive Patterns of Printed Circuit Boards], *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem [Reliability and Quality of Complex Systems]*, 2017, No. 2 (18), Pp. 68–76. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-10. (In Russian)
3. Skladnova M. S. Metody kontrolya pechatnykh plat [PCB Control Methods], *Colloquium-journal*, 2019, No. 25-2 (49), Pp. 95–97. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10882. (In Russian)
4. Ksenofontov V. V. Neyronnye seti [Neural networks], *Problemy nauki*, 2020, No. 11 (59), Pp. 28–29. (In Russian)
5. Smith R. G., Eckroth J. Building AI Applications: Yesterday, Today, and Tomorrow, *AI Magazine*, 2017, Vol. 38, No. 1, Pp. 6–22. DOI: 10.1609/aimag.v38i1.2709.
6. Yağcı B. E., Demirsoy G., Akpolat A. N. General Overview of Artificial Neural Network Applications in Renewable Energy Systems, *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 2024, Vol. 9, No. 3, Pp. 95–107.
7. Alekseeva N. S. Raspoznavanie lits po fotografii s pomoshchyu neyronnykh setey [Face Recognition from a Photo Using Neural Networks], *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik*, 2021, No. 1, 5 p. Available at: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=20406> (accessed: January 17, 2025). (In Russian)

8. Sharipova D. D. Neyronnaya set ImageAI: raspoznavanie obektov [ImageAI Neural Network: Object Recognition], *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya [Information Technology]*, 2020, No. 2 (11), Pp. 140–144. (In Russian)
9. Bondarenko V. I., Nestrugina E. S. Sistema raspoznavaniya lits prestupnikov s pomoshchyu kamer videonablyudeniya [Facial recognition system for criminals using CCTV cameras], *Donetskie chteniya 2022: obrazovanie, nauka, innovatsii, kultura i vyzovy sovremennosti: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Donetsk Readings 2022: Education, Science, Innovation, Culture and Challenges of Our Time: Proceedings of the VII International Scientific Conference]*, Donetsk, October 27–28, 2022. Vol. 2. Donetsk: Donetsk National University, 2022, Pp. 236–237. (In Russian)
10. Bolikov S. S. Mashinnoe zrenie i neyronnye seti [Machine vision and neural networks], *Konkurentosposobnost territoriy: materialy XX Vserossiyskogo ekonomicheskogo foruma molodykh uchenykh i studentov [Competitiveness of territories: Proceedings of the XX All-Russian Economic Forum of Young Scientists and Students]*, Yekaterinburg, Russia, April 27–28, 2017. Part 8. Yekaterinburg, Ural State University of Economics, 2017, Pp. 21–22. (In Russian)
11. Vaishya R., Javaid M., Khan I. H., Haleem A. Artificial Intelligence (AI) Applications for COVID-19 Pandemic, *Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*, 2020, Vol. 14, Iss. 4, Pp. 337–339. DOI: 10.1016/j.dsx.2020.04.012.
12. Mohamed Y. A., Khanan A., Bashir M., et al. The Impact of Artificial Intelligence on Language Translation: A Review, *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, Pp. 25553–25579. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3366802.
13. Muratova U. D. Izucheniye neyronnykh setey dlya chat-botov [Study of Neural Networks for Chatbots], *Sbornik trudov IX Kongressa molodykh uchenykh [Proceedings of the IX Congress of Young Scientists]*. Saint Petersburg, Russia, April 15–18, 2020. Vol. 1. Saint Petersburg, ITMO University, 2021, Pp. 92–95. (In Russian)
14. Kravchenko D. Yu., Kravchenko Yu. A., Mansur A., et al. Algoritm optimizatsii izvlecheniya klyuchevykh slov na osnove primeneniya lingvisticheskogo parsera [Algorithm for Optimization of Keyword Extraction Based on the Application of a Linguistic Parser], *Informatika i avtomatizatsiya [Informatics and Automation]*, 2024, Vol. 23, No. 2, Pp. 467–494. DOI: 10.15622/ia.23.2.6. (In Russian)
15. Li X., Sigov A., Ratkin L., et al. Artificial Intelligence Applications in Finance: A Survey, *Journal of Management Analytics*, 2023, Vol. 10, Iss. 4, Pp. 676–692. DOI: 10.1080/23270012.2023.2244503.
16. Joshi N., Dave T. Improved Accuracy for Heart Disease Diagnosis Using Machine Learning Techniques, *Journal of Informatics and Web Engineering*, 2025, Vol. 4, No. 1, Pp. 42–52. DOI: 10.33093/jiwe.2025.4.1.4.
17. Datilo P. M., Ismail Z., Dare J. A Review of Epidemic Forecasting Using Artificial Neural Networks, *Epidemiology and Health System Journal*, 2019, Vol. 6, Iss. 3, Pp. 132–143. DOI: 10.15171/ijer.2019.24.
18. Atan O., Jordon J., van der Schaar M. Deep-Treat: Learning Optimal Personalized Treatments from Observational Data Using Neural Networks, *Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, New Orleans, LA, USA, February 02–07, 2018*. Palo Alto (CA), AAAI Press, 2018, Pp. 2071–2078. DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11841.
19. Li C., Wang Y., Bai H., et al. Deep Neural Network Provides Personalized Treatment Recommendations for *de novo* Metastatic Breast Cancer Patients, *Journal of Cancer*, 2024, Vol. 15, Iss. 20, Pp. 6668–6685. DOI: 10.7150/jca.101293.
20. Widayani A., Putra A. M., Maghriebe A. R., et al. Review of Application YOLOv8 in Medical Imaging, *Indonesian Applied Physics Letters*, 2024, Vol. 5, No. 1, Pp. 23–33. DOI: 10.20473/iapl.v5i1.57001.
21. Mumali F. Artificial Neural Network-Based Decision Support Systems in Manufacturing Processes: A Systematic Literature Review, *Computers and Industrial Engineering*, 2022, Vol. 165, Art. No. 107964, 20 p. DOI: 10.1016/j.cie.2022.107964.
22. Ribeiro J., Lima R., Eckhardt T., Paiva S. Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 — A Literature Review, *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 181, Pp. 51–58. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.104.
23. Edelev D. A., Blagoveshchenskaya M. M., Blagoveshchenskiy I. G. Ispolzovanie neyronnykh setey kak faktora povysheniya kachestva i bezopasnosti proizvodstva pishchevykh produktov pri reshenii zadach avtomatizatsii [Using neural networks as a factor in improving the quality and safety of food production in solving automation problems], *Avtom-*

atizatsiya tekhnologicheskikh i biznes-protsessov [Automation of Technological and Business Processes], 2015, Vol. 7, No. 1 (21), Pp. 7–10. DOI: 10.15673/2312-3125.21/2015.42856. (In Russian)

24. Akhatova A. PCB Defects, *Kaggle*. Available at: <http://www.kaggle.com/datasets/akhatova/pcb-defects> (accessed: January 17, 2025).

25. Cheremisinova O. N., Rostovtsev V. S. Povyshenie kachestva raspoznavaniya izobrazheniy podborom parametrov svertochnoy neyronnoy seti [Improving the quality of image recognition by selecting convolutional neural network parameters], *Integratsiya nauki v sovremennom mire: sbornik nauchnykh rabot 52-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Evraziyskogo Nauchnogo Obedineniya* [Integration of Science in the Modern World: Scientific Articles Collection of the 52nd International Scientific Conference of Eurasian Scientific Association], Moscow, Russia, June 2019. Moscow, Eurasian Scientific Association, 2019, Pp. 114–118. (In Russian)

26. Sirisha U., Praveen S. P., Srinivasu P. N., et al. Statistical Analysis of Design Aspects of Various YOLO-Based Deep Learning Models for Object Detection, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2023, Vol. 16, Art. No. 126, 29 p. DOI: 10.1007/s44196-023-00302-w.

27. Ultralytics YOLO. Available at: <http://www.ultralytics.com/yolo> (accessed: January 17, 2025).

28. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, Pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.

29. Google Colaboratory. Available at: <http://colab.google> (accessed: January 17, 2025).

30. F1-Score, *Ultralytics*. URL: <http://www.ultralytics.com/glossary/f1-score> (accessed: January 17, 2025).

Received: 26.03.2025

Accepted: 15.05.2025

УДК 004.4

Цифровая трансформация медиапространства: машинное обучение в развитии коммуникаций и формировании контента

- Петрушичева Анастасия Юрьевна** — магистрант 1-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: информационные системы, искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальность.
E-mail: nastyapetrushicheva@gmail.com
- Дьяченко Никита Иванович** — магистрант 1-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: информационные системы, базы данных.
E-mail: dacenkonikita439@gmail.com
- Ермаков Сергей Геннадьевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: политика в области цифровой трансформации и открытых данных, корпоративные системы управления данными, управление большими данными. E-mail: ermakov@pgups.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Петрушичева А. Ю., Дьяченко Н. И., Ермаков С. Г. Цифровая трансформация медиапространства: машинное обучение в развитии коммуникаций и формировании контента // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 42–49. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-42-49

Аннотация. *Исследуется влияние цифровой трансформации на медиаиндустрию с акцентом на использование технологий искусственного интеллекта. Рассматриваются изменения в подходах к созданию, обработке и персонализации контента, которые включают автоматизацию модерации, улучшение качества визуальных материалов, генерации новых форматов медиа и защиту от фальсификаций. Цель: анализ того, как внедрение технологий искусственного интеллекта трансформирует процессы создания, обработки и персонализации контента. Результаты: показывают, что использование искусственного интеллекта способствует автоматизации модерации, улучшает качество визуальных материалов, упрощает генерацию новых медиаформатов и усиливает защиту контента от фальсификаций. Практическая значимость: заключается в выявлении перспектив применения ИИ-технологий для повышения эффективности и качества медиапроизводства, а также в обозначении направлений их интеграции в различные этапы медиацикла.*

Ключевые слова: цифровая журналистика, цифровизация, машинное обучение, сверточные нейронные сети, генеративно-состязательные сети

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

За последнее десятилетие произошла существенная трансформация цифровой медиакоммуникационной среды. Ввиду активного внедрения цифровизации в медиа возникли новые технологии и методы создания современного контента, что

привело к изменениям их природы и современного состояния. В результате подобных трансформаций в образовательной среде возник новый термин — «цифровая журналистика», т. е. создание и распространение актуальной информации через различ-

ные сервисы, такие как социальные сети, каналы, большие данные и т. д. [1].

Понятие цифровой журналистики также сохраняет в себе свои традиционные принципы и ценности, но пребывает теперь в технологически новых условиях.

В наше время возникает необходимость поиска журналистов, способных работать в цифровой медиасреде, и проявляется она не только в самой медиасфере, но и в обществе в целом. Это подтверждается повседневными спорами о противостоянии журналистов с блогерами, а также потребностью молодых людей влиться в эту профессию, существующую уже несколько столетий, но при этом переживающую на сегодняшний день цифровую трансформацию.

Целью статьи является исследование влияния технологий искусственного интеллекта (ИИ) на современную журналистику в контексте процессов создания и обработки контента. Авторами был проведен анализ применения таких технологий, как сверточные нейронные сети и генеративно-сопоставительные сети для решения задач модерации контента, улучшения качества визуальных материалов и создания новых форматов видео.

Объектом исследования в работе является влияние технологий ИИ на традиционные подходы журналистики. Новизна работы заключается в комплексном рассмотрении применения технологий искусственного интеллекта в процессе трансформации журналистской деятельности, а также в анализе потенциала нейросетевых моделей для решения практических задач, таких как автоматическая модерация, персонализация и генерация медиаконтента.

Цифровое развитие медиасистемы

Если говорить об отличительных особенностях современной медиаиндустрии, то в первую очередь следует упомянуть электронный формат традиционных СМИ. В последнее время практически все редакции массмедиа перешли в электронное пространство, где осуществляется наиболее эффективное формирование и распространение информационного и развлекательного контента. Но

все так же журналисты и медиа обязаны соблюдать законы и этические нормы в новом формате, все так же журналисты остаются объективным источником достоверной информации.

В свою очередь, цифровизация привела журналистику к новым технологическим инструментам и форматам: так, если раньше в газетах можно было увидеть только текст с несколькими фотографиями, то сейчас информационные и развлекательные материалы буквально оживают — в них используются различные инфографики, применяются гипертекст, дополненная реальность и визуальная составляющая в формате видео и GIF-изображений [2].

Цифровая трансформация также привела к новому уровню взаимоотношений аудитории с журналистами. Возникают новые жанры и гибридные форматы, в которых активизируется прямое взаимодействие двух сторон через комментарии, отзывы и совместное создание того или иного контента. Данный феномен приводит нас к созданию персонализированного контента, чем, в свою очередь, уступает традиционная журналистика, выпуская свой материал преимущественно в массы.

Следует отметить и широкий спектр вариаций распространения контента. Современные медиаструктуры используют огромное количество различных платформ, таких как web-сайты, мобильные приложения и другие электронные каналы, благодаря чему достигается больший объем заинтересованной аудитории.

В условиях цифровизации сформировались некоторые тенденции развития и создания медиаконтента:

- внутренняя конкуренция между традиционным медиабизнесом и новыми цифровыми структурами;
- возникновение узкотематических медиа, которые будут создавать специализированный контент на определенную тематику для нишевых аудиторий;
- Journalism as a Service. Как упоминалось выше, цифровизация способствует созданию узкоспециализированного контента. Это, в свою очередь, приводит к возможности предоставлять журналистские услуги как сервис;

— realtime-контент, то есть создание и публикация контента в режиме реального времени, на основе информации и событий, которые существуют и происходят здесь и сейчас. А чтобы быстро и точно собирать и обрабатывать информацию, на помощь приходят искусственный интеллект и анализ данных.

Противоречия между традиционными методами создания контента и современными технологиями на основе искусственного интеллекта

Традиционная журналистика, которая основана на человеческом участии, выделяется глубоким анализом, креативным подходом и высокой степенью ответственности за достоверность информации. Журналисты тщательно проверяют источники и стремятся избегать фейков [3]. Они создают контент, который обладает уникальным стилем и глубиной, поскольку каждый автор проводит то или иное событие через свою индивидуальную призму восприятия. Однако эти процессы требуют значительно большего времени и усилий, что ограничивает скорость выпуска материалов. На рис. 1 показан результат запроса к нейросети на

тему противоречий традиционных и современных методов создания контента.

Современные технологии, такие как искусственный интеллект и машинное обучение, способны генерировать огромные объемы контента за короткое время. ИИ анализирует массивы данных, быстро обрабатывает информацию и предоставляет готовые материалы или аналитические отчеты. Это значительно ускоряет работу редакций и повышает продуктивность. Однако ИИ может ошибаться и зачастую допускает ошибки. Так, он может создавать материалы с низкой достоверностью, если алгоритмы обучены на недостоверных данных.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что основное противоречие заключается в балансе между качеством и скоростью. Традиционные методы обеспечивают глубину и точность, но при этом они медленны. Искусственный интеллект, напротив, эффективен, но пока не способен в полной мере гарантировать достоверность и уникальность материала. Тем не менее машинное обучение непрерывно развивается, а вместе с ним совершенствуются и методы создания качественного и достоверного медиаконтента.

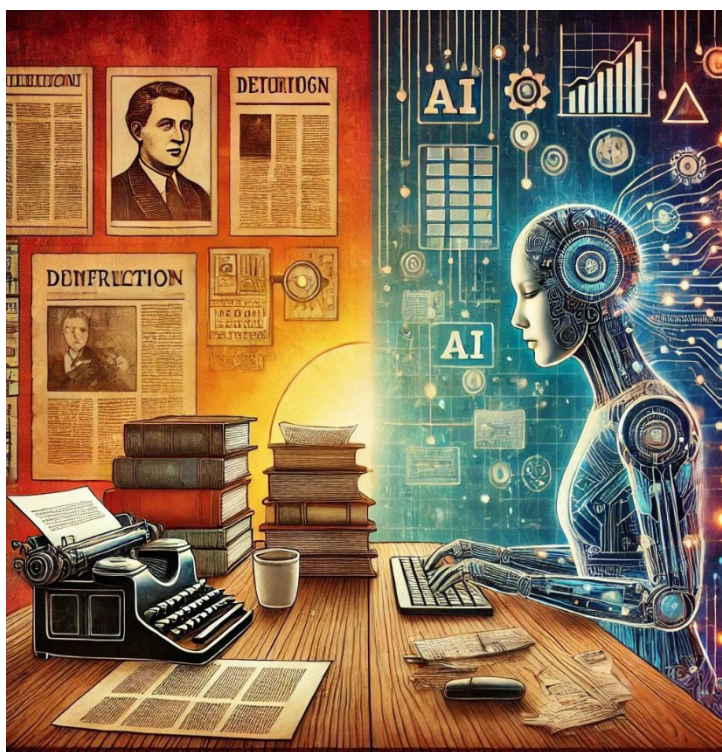


Рис. 1. Противоречия между традиционными методами создания контента и современными технологиями на основе ИИ (сгенерировано нейросетью)

Использование моделей машинного обучения в анализе, обработке и генерации медиаконтента

Машинным обучением называют область искусственного интеллекта, которая специализируется на разработке моделей и алгоритмов, способных обучаться на данных и делать на их основе прогнозы. В основе машинного обучения лежат математические модели, которые анализируют данные, выявляют закономерности и на их основе прогнозируют или решают конкретные задачи. Примером модели машинного обучения может служить алгоритм, предназначенный для решения задачи классификации объектов на изображении.

В медиасфере существует множество проблем и задач, которые могут решаться с помощью применения различных типов моделей и алгоритмов машинного обучения. Примерами таких задач могут служить распознавание объектов для персонализации контента или категоризация материалов для фильтрации запрещенного содержания. В контексте этих задач обычно обрабатывается визуальный контент.

Для решения задач, связанных с обработкой медиаконтента, часто применяются сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), что подробно рассматривается далее.

Применение сверточных нейронных сетей в медиасфере

Сверточные нейронные сети представляют собой модели, обученные на размеченных данных (обучение с учителем) [4]. Обучение происходит на наборах данных, где каждому объекту соответствует метка, которая указывает на его класс или категорию. В процессе обработки изображений сверточные нейронные сети последовательно извлекают признаки разного уровня абстракции: от простых элементов, таких как края и текстуры, до более сложных и высокоуровневых характеристик, отражающих общую структуру и смысл визуального объекта [5]. Эта особенность делает их очень эффективными для решения задач обработки визуального контента.

Основные направления использования CNN в медиасфере:

1. Автоматическая модерация контента. Сверточные нейронные сети используются для анализа контента (изображений и видео), который загружается пользователями, с целью выявления и фильтрации нежелательного контента.

2. Персонализация контента. CNN используются для анализа предпочтений пользователей на основе их взаимодействия с визуальным контентом. На основе просмотренных пользователем изображений или миниатюр рекомендуются определенные фильмы, видео и статьи.

3. Реклама и маркетинг. Сверточные нейронные сети позволяют оптимизировать визуальное содержимое рекламных кампаний. Примером использования может быть, например, выбор наиболее привлекательных изображений для рекламных баннеров или предсказание эффективности визуальной рекламы с учетом цветовых схем, объектов и композиций.

4. Категоризация медиаконтента. В медиасфере часто возникает необходимость распознавания и классификации контента, что решается применением сверточных нейронных сетей [6]. Примером применения является распределение изображений и видео по категориям (новости, спорт, развлечения).

Таким образом, сверточные нейронные сети широко используются для решения различных задач в сфере медиа. Современные модели, построенные на основе CNN, способны эффективно анализировать и обрабатывать визуальный контент, что позволяет не только автоматизировать сложные процессы, но и способствует созданию более персонализированного и качественного пользовательского опыта.

Применение генеративно-сопоставительных сетей для улучшения качества фото и видео

В современной медиасфере часто возникает необходимость улучшения качества фото и видео, например для восстановления архивных материалов или повышения визуальной привлекательности контента. Для решения этих задач часто применяются генеративно-сопоставительные сети (Generative Adversarial Networks, GAN), которые представляют собой модели, обученные на неразмеченных

данных (обучение без учителя) [7]. При таком обучении алгоритмы анализируют и структурируют данные без использования меток и категорий, самостоятельно исследуя их структуру и выявляя скрытые закономерности. Особенностью генеративно-состязательных сетей является то, что их обучение происходит путем взаимодействия двух нейронных сетей, в котором одна нейронная сеть генерирует новые данные, а другая оценивает их на подлинность. Компонент, отвечающий за генерацию данных, называется генератором, а тот, что оценивает их подлинность, — дискриминатором [8].

Основные направления использования генеративных сетей в сфере медиа:

1. Создание и улучшение визуального контента. GAN могут использоваться для генерации визуальных материалов, таких как изображения, видео и анимации [9]. Генерация может происходить на основе текстового описания, которое поступает на вход нейронной сети или путем переработки и дополнения существующего изображения [10]. На рис. 2 изображены возможные обложки данной ста-

тьи, которые были сгенерированы с помощью Midjourney — нейросети, создающей реалистичные изображения по текстовому описанию.

2. Улучшение взаимодействия с пользователями. Генеративные сети могут быть использованы для создания уникальных изображений и видео, адаптированных под интересы пользователя. Например, платформа может анализировать предпочтения пользователя и создавать рекламные баннеры или видео, которые более вероятно привлекут внимание.

3. Модерация контента и борьба с фальсификацией. GAN могут быть использованы для выявления фальшивых изображений или видео, что полезно для борьбы с распространением дезинформации. Некоторые платформы, например YouTube, используют генеративные сети для выявления дипфейк-контента или измененных изображений.

4. Реставрация архивных материалов. Генеративные сети применяются для восстановления старых фото и видео путем удаления артефактов, добавления недостающих деталей и улучшения общего качества фотографии. Это особенно важно

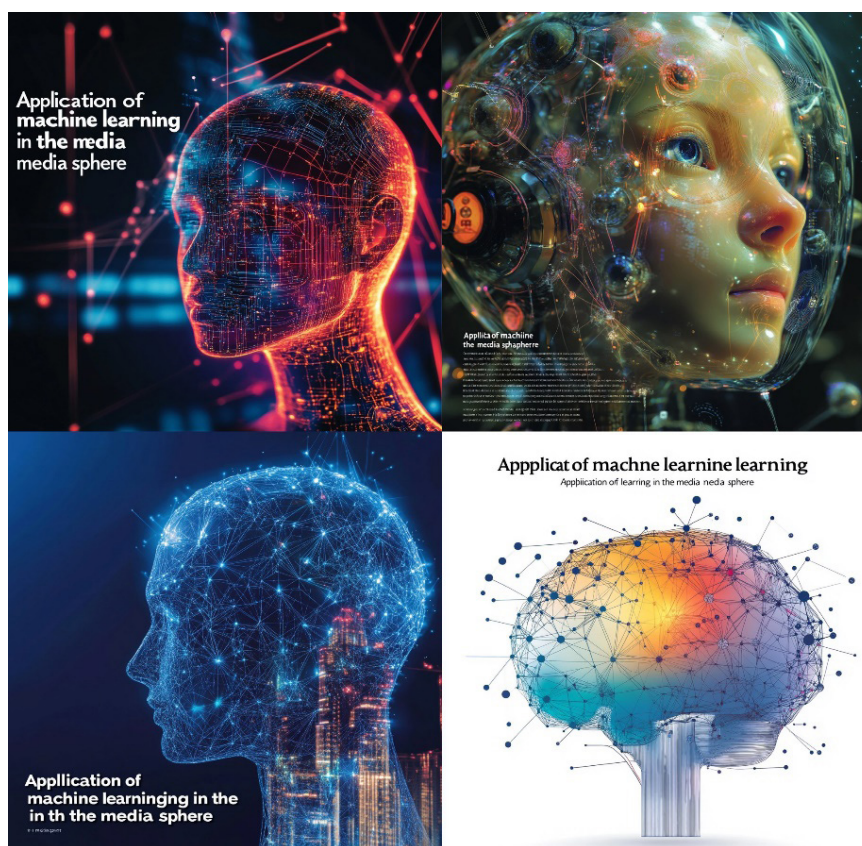


Рис. 2. Пример работы нейросети Midjourney

для архивных фильмов, документальных хроник и исторических фотографий.

5. Создание анимации и спецэффектов. С помощью моделей на основе генеративных сетей создаются реалистичные спецэффекты в играх и фильмах. Например, модель может генерировать сложные природные явления (дым, вода, огонь) или анимировать персонажей на основе реальных движений. Использование таких моделей позволяет существенно сократить время и стоимость работы художников-аниматоров.

Из рис. 2 видно, что Midjourney способна создавать красочные обложки для статей, что делает ее полезным инструментом при работе с медиаконтентом.

Столь широкий спектр применения делает генеративно-состязательные сети одним из основных инструментов, трансформирующих медиаиндустрию. Качество контента улучшается, его персонализация усиливается, а защищенность от фальсификации возрастает.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значительное влияние технологий искусственного интеллекта на трансформацию современной журналистики. Использование сверточных нейронных сетей позволяет автоматизировать процесс персонализации контента, улучшая его релевантность и

соответствие интересам аудитории. Применение генеративно-состязательных сетей способствует повышению качества визуальных материалов и созданию новых форматов, что особенно актуально в условиях мультимедийного подхода к подаче информации.

В рамках работы были рассмотрены основные принципы функционирования CNN и GAN, а также проанализированы их возможности и ограничения при решении задач в медиаиндустрии. Полученные результаты подтверждают достижение поставленной цели: продемонстрировано, как ИИ-технологии могут использоваться для оптимизации процессов создания и обработки медиаконтента.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе применения указанных технологий в контексте журналистики, что способствует более глубокому пониманию перспектив и вызовов цифровой трансформации. Это открывает возможности для дальнейших исследований, включая разработку практических решений для интеграции ИИ в редакционные процессы, а также оценку их влияния на достоверность и качество создаваемого контента.

Таким образом, результаты исследования имеют практическую значимость как для профессионального медиасообщества, так и для образовательной среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Червоняцкий В. В. Цифровая трансформация журналистики: роль креатива и диджитал-технологий // Практический маркетинг. 2023. № 5 (311). С. 40–48. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-5311-40-48.
2. Половнева М. В. Анализ развития и применения технологии чат-бот // Теория и практика современной науки. 2018. № 6 (36). С. 917–920.
3. Морозова А. А., Арсентьева А. Д. Проблемы и перспективы использования искусственного интеллекта в сфере массмедиа: мнение российской аудитории // Знак: проблемное поле медиаобразования. 2022. № 2 (44). С. 150–158. DOI: 10.47475/2070-0695-2022-10219.
4. Что такое обучение с учителем в машинном обучении // Skypro Wiki. URL: <http://sky.pro/wiki/python/chto-takoe-obuchenie-s-uchitelem-v-mashinnom-obuchenii> (дата обращения: 18.12.2024).
5. Маршалко Д. А., Кубанских О. В. Архитектура сверточных нейронных сетей // Ученые записки Брянского государственного университета. 2019. № 4 (16). С. 10–13.
6. Сайфутдинов А. В. Сверточные нейронные сети для решения задач компьютерного зрения // Universum: технические науки. 2023. № 10 (115), Ч. 1. С. 42–44. DOI: 10.32743/UniTech.2023.115.10.16127.

7. Что такое обучение без учителя в машинном обучении // Skypro Wiki. URL: <http://sky.pro/wiki/python/chto-takoe-obuchenie-bez-uchitelya-v-mashinnom-obuchenii> (дата обращения: 20.12.2024).
8. Левин А. О., Белов Ю. С. Использование генеративно-сопоставительных сетей для генерации изображений по тексту // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 2. С. 11–15. DOI: 10.17513/srts.1427.
9. Аверченков А. В., Андросов А. А., Малахов Ю. А. Анализ и применение генеративно-сопоставительных сетей для получения изображений высокого качества // Эргодизайн. 2020. № 4 (10). С. 167–176. DOI: 10.30987/2658-4026-2020-4-167-176.
10. Применение генеративно-сопоставительных нейросетей для генерации изображений / Е. В. Ильинская, Е. Н. Голышева, А. А. Медведев, Н. С. Масалитин // Научный результат. Информационные технологии. 2024. Т. 9, № 1. С. 73–78. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-1-0-8.

Дата поступления: 15.05.2025

Решение о публикации: 24.05.2025

Digital Transformation of Media: Machine Learning in Communication Development and Content Creation

- Anastasiya Yu. Petrushicheva** — 1st year Master's Degree Student of the 09.04.02 direction "Information systems and technologies". Research interests: information systems, artificial intelligence, virtual and augmented reality. E-mail: nastyapetrushicheva@gmail.com
- Nikita I. Dyachenko** — 1st year Master's Degree Student of the 09.04.02 direction "Information systems and technologies". Research interests: information systems, databases. E-mail: dacenkonikita439@gmail.com
- Sergey G. Ermakov** — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Information and Computing Systems Department. Research interests: digital transformation and open data policy, corporate data management systems, big data management. E-mail: ermakov@pgups.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Petrushicheva A. Yu., Dyachenko N. I., Ermakov S. G. Digital Transformation of Media: Machine Learning in Communication Development and Content Creation. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 42–49. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-42-49. (In Russian)

Abstract. *This paper explores the impact of digital transformation on the media industry, focusing on the use of artificial intelligence technologies. The authors examine changes in approaches to content creation, processing, and personalization, including automated moderation, enhancement of visual content quality, generation of new media formats, and protection against falsifications. **Purpose:** to analyze how the implementation of AI technologies transforms the processes of content creation, processing, and personalization. **Results:** AI technology contributes to the automation of moderation, improves the quality of visual materials, facilitates the generation of new media formats, and enhances content protection against falsification. **Practical significance:** the potential of AI technologies lies in enhancing the efficiency and quality of media production, as well as in outlining directions for their integration into various stages of the media cycle.*

Keywords: *digital journalism, digitalization, machine learning, convolutional neural networks, generative adversarial networks*

REFERENCES

1. Chervonyashchy V. V. Tsifrovaya transformatsiya zhurnalistiki: rol kreativa i didzhital-tekhnologiy [Digital Transformation of Journalism: The Role of Creativity and Digital Technologies], *Prakticheskiy marketing [Practical Marketing]*, 2023, No. 5 (311), Pp. 40–48. DOI: 10.24412/2071-3762-2023-5311-40-48. (In Russian)
2. Polovneva M. V. Analiz razvitiya i primeneniya tekhnologii chat-bot [Analysis of Development and Application of Chat-Bot Technology], *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2018, No. 6 (36), Pp. 917–920. (In Russian)
3. Morozova A. A., Arsentieva A. D. Problemy i perspektivy ispolzovaniya iskusstvennogo intellekta v sfere massmedia: mnenie rossiyskoy auditorii [Problems and Prospects of the Use of Artificial Intelligence in the Sphere of Mass Media: Opinion of the Russian Audience], *Znak: problemnoe pole mediaobrazovaniya*, 2022, No. 2 (44), Pp. 150–158. DOI: 10.47475/2070-0695-2022-10219. (In Russian)
4. Chto takoe obuchenie s uchitelem v mashinnom obuchenii [What is Supervised Learning in Machine Learning], *Skypro Wiki*. Available at: <http://sky.pro/wiki/python/chto-takoe-obuchenie-s-uchitelem-v-mashinnom-obuchenii> (accessed: December 18, 2024). (In Russian)
5. Marshalko D. A., Kubanskiy O. V. Arkhitektura svertochnykh neyronnykh setey [Convolutional Neural Network Architecture], *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific Notes of the Bryansk State University]*, 2019, No. 4 (16), Pp. 10–13. (In Russian)
6. Sayfutdinov A. V. Svertochnye neyronnye seti dlya resheniya zadach kompyuternogo zreniya [Convolutional Neural Networks for Solving Computer Vision Problems], *Universum: Tekhnicheskie Nauki*, 2023, No. 10 (115), Part 1, Pp. 42–44. DOI: 10.32743/UniTech.2023.115.10.16127. (In Russian)
7. Chto takoe obuchenie bez uchitelya v mashinnom obuchenii [What is unsupervised learning in machine learning], *Skypro Wiki*. Available at: <http://sky.pro/wiki/python/chto-takoe-obuchenie-bez-uchitelya-v-mashinnom-obuchenii> (accessed: December 20, 2024). (In Russian)
8. Levin A. O., Belov Yu. S. Ispolzovanie generativno-sostyazatelnykh setey dlya generatsii izobrazheniy po tekstu [Application of Generative-Adversarial Networks to Text to Image Generation], *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki [Scientific Review. Technical Science]*, 2023, No. 2, Pp. 11–15. DOI: 10.17513/srts.1427. (In Russian)
9. Averchenkov A. V., Androsov A. A., Malakhov Y. A. Analiz i primeneniye generativno-sostyazatelnykh setey dlya polucheniya izobrazheniy vysokogo kachestva [Analysis and Application of Generative-Adversarial Networks for Producing High Quality Images], *Ergodizayn [Ergodesign]*, 2020, No. 4 (10), Pp. 167–176. DOI: 10.30987/2658-4026-2020-4-167-176. (In Russian)
10. Ilyinskaya E. V., Golysheva E. N., Medvedev A. A., Masalitin N. S. Primeneniye generativno-sostyazatelnykh neyrosetey dlya generatsii izobrazheniy [The Use of Generative-Adversarial Neural Networks for Image Generation], *Nauchnyy rezultat. Informatsionnye tekhnologii [Research Result. Information Technologies]*, 2024, Vol. 9, No. 1, Pp. 73–78. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-1-0-8. (In Russian)

Received: 15.05.2025

Accepted: 24.05.2025

УДК 681.300

Структурный принцип при осуществлении мониторинга преподавания дисциплин гуманитарного направления

- Бурсиан Елена Юрьевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высшая математика». Научные интересы: распознавание рукописного текста, нейронные сети, математическое моделирование с помощью теории графов. E-mail: bursianeu@mail.ru
- Минеева Диана Дмитриевна** — студент 2-го курса направления 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем». Научные интересы: информационная безопасность, нейронные сети. E-mail: i4160@mail.ru
- Ушакова Тамара Ивановна** — старший преподаватель кафедры «Высшая математика». Научные интересы: распознавание рукописного текста, нейронные сети, математическое моделирование с помощью теории графов. E-mail: ushakova960@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бурсиан Е. Ю., Минеева Д. Д., Ушакова Т. И. Структурный принцип при осуществлении мониторинга преподавания дисциплин гуманитарного направления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 50–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-50-57

Аннотация. *Представлены результаты статистической обработки опросов студентов об их отношении к некоторым дисциплинам гуманитарного цикла. Цель исследования:* выявление структурных связей между дисциплинами и типами целевой ориентации обучающихся. **Методы:** использование статистических методик на базе коэффициентов ранговой корреляции и теории графов. **Результаты:** создана экспериментальная модель образовательного процесса для цикла дисциплин гуманитарного направления в университете, обеспечивающая качественный анализ педагогической деятельности. Построенная модель основана на вероятностных и статистических методах теории графов. Разработан комплекс программ, необходимый для функционирования модели на языке Вольфрам. Достигнуто повышение интереса студентов к управлению образовательной деятельностью и созданию условий для ее совершенствования и установления необходимых связей между участниками образовательной деятельности. **Практическая значимость:** построенная модель позволяет участникам педагогического процесса, в частности студентам, активно участвовать в педагогической деятельности университета.

Ключевые слова: мониторинг учебного процесса, коэффициент корреляции Спирмена, коэффициент корреляции Кендалла, структурная модель, выборочное среднее

2.3.1 — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);
1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Необходимый компонент мониторинга образовательного процесса — учет пожеланий студентов и тенденций развития современного образования [1, 2].

Существующая система не в полной мере учитывает пожелания и требования студентов [3–5]. Необходимо выявить реальную значимость для студен-

тов различных методов преподавания и организации учебного процесса (дискуссии, проекты).

Разработка методов учета требований студентов к учебному процессу

В представленной модели выделены ключевые показатели: вовлеченность студентов в образовательный процесс; актуальность, логичность, структурированность, доступность и адаптивность, а также четкость изложения учебного материала; соразмерность учебной нагрузки; наличие обратной связи от преподавателя.

Таким образом, для анализа взаимосвязей между дисциплинами, формирующими общие компетенции гуманитарного аспекта, предложено использовать представление в виде графа. Граф позволяет одновременно учитывать как количественные данные, так и качественные зависимости. Вершины графа соответствуют дисциплинам, при этом построение начинается с вершины, имеющей наивысший средний балл оценки в рамках рассматриваемой группы. Использование ядер и центров графа позволяет определить дисциплины, играющие наиболее важную роль в формировании общих компетенций. Ребра графа определяются на основе наиболее значимых связей и согласованности между дисциплинами, а вершины нагружаются скалярными или векторными характеристиками, полученными в ходе экспериментальных исследований, что дает возможность интеграции данных в единую систему анализа [6–9].

Тем самым построение структурной модели зависимостей между предметами гуманитарного аспекта в работе предлагается основывать на коэффициентах ранговой корреляции. При этом испытуемые заполняют таблицы критериальных значений независимо друг от друга. Эксперимент позволяет построить векторы ранговых показателей сравниваемых предметов $a_1, a_2, \dots, a_k$ и $b_1, b_2, \dots, b_k$ [10]. В работе использовался следующий метод нахождения коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ :

1. Если показатели имеют одинаковые значения $a_p \dots a_q$, они заменяются на

$$a'_i = \frac{(a'_p + \dots + a'_q)}{(p - q + 1)},$$

где

$$a'_i = a_i + \varepsilon_i, \varepsilon_i \neq 0, i, j \in \overline{1, k}, \varepsilon_i \neq \varepsilon_j \text{ при } i \neq j,$$

ε_i — величины, выбираемые достаточно малыми для того, чтобы взаимный порядок различающихся a_i не изменился. Индексы испытуемых (компоненты векторов) $\overline{a_i}$ устанавливаются на основе упорядочивания результирующих величин вектора a_i . Аналогичная процедура производится для вектора $b_1 \dots b_k$.

2. Для нахождения коэффициента ранговой корреляции Спирмена используется формула:

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (\overline{a_i} - \overline{b_i})^2}{C_{k+1}^3}.$$

При построении структурной модели образовательного процесса рассматривается пример применения корреляционных методик, основанных на независимой оценке преподавания дисциплин студентами. В ходе исследования сформированы два массива ранжированных оценок сравниваемых дисциплин: $X_1, X_2, \dots, X_n$ и $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, где n — объем выборки.

Для вычисления коэффициента ранговой корреляции Кендалла применяется алгоритм вычисления τ_B , так как применение алгоритма вычисления τ_A не приводит к удовлетворительным результатам при равных значениях компонент сравниваемых векторов.

1. Все пары компонент сравниваемых векторов распределяются по трем категориям.

К первой категории (координированные пары) относятся пары индексов i и j , значения показателей которых в обоих массивах одновременно строго возрастают или строго убывают, то есть

$$\overline{a_i} > \overline{a_j} \wedge \overline{b_i} > \overline{b_j} \vee \overline{a_i} < \overline{a_j} \wedge \overline{b_i} < \overline{b_j}.$$

Ко второй категории (дискоординированные пары) принадлежат пары индексов i и j , для которых возрастание значений показателей происходит в противоположных направлениях, то есть

$$\overline{a_i} > \overline{a_j} \wedge \overline{b_i} < \overline{b_j} \vee \overline{a_i} < \overline{a_j} \wedge \overline{b_i} > \overline{b_j}.$$

К третьей категории (пары, не являющиеся ни координированными, ни дискоординированными) относятся все оставшиеся пары, то есть пары, значения показателей которых хотя бы в одном из массивов равны:

$$\overline{a_i} = \overline{a_j} \vee \overline{b_i} = \overline{b_j}.$$

2. Коэффициент ранговой корреляции Кендалла находится при помощи формулы:

$$\tau_B = \frac{K_c - K_d}{\sqrt{D_a D_b}},$$

где K_c — число пар первой категории;

K_d — число пар второй категории;

D_a — число пар, значения которых в массиве a различны;

D_b — число пар, значения которых в массиве b различны.

Формула

$$|\rho| > t_{crit}(\alpha, n-2) \sqrt{\frac{1-\rho^2}{n-2}}$$

дает значимость коэффициента корреляции Спирмена ρ . То есть

$$|\rho| > \rho_{crit} = \sqrt{1 - \frac{n-2}{n-2 + t_{crit}^2(\alpha, n-2)}},$$

где t_{crit} — критическая точка распределения Стюдента.

Формула

$$\left| \operatorname{erf} \left(\tau_B \sqrt{\frac{9n(n-1)}{4(2n+5)}} \right) \right| > 1 - \alpha$$

дает значимость коэффициента корреляции Кендалла τ_B , где $\operatorname{erf}(x)$ — Гауссова функция ошибок,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Приведенные формулы позволяют статистически оценить значимость коэффициентов корреляции Спирмена и Кендалла, что является важным инструментом для анализа полученных экспериментальных данных.

Статистические оценки значений исследуемых показателей эффективности педагогического процесса в университете

В ходе эксперимента осуществлялся мониторинг учебного процесса на втором и третьем курсах в отношении студентов наборов 2022 и 2023 годов в двух учебных группах.

Анкетирование осуществлялось в анонимной форме с использованием онлайн-опроса. Студентам предлагалось оценить преподавание ряда дисциплин на основе качественных субъективных характеристик следующих дисциплин: иностранный язык, русский язык, история, философия и психология. Оценивание проводилось по десятибалльной шкале, что обеспечивает ясность восприятия и высокую степень детализации оценок. Данная шкала позволяет фиксировать минимальные различия, повышая точность результатов и упрощая их статистическую обработку.

Результаты эксперимента представлены в виде графических моделей. В каждом отдельном случае выделенной дисциплине соответствует центральная вершина графа. Остальным вершинам графа соответствуют гуманитарные дисциплины, способствующие развитию личностных и универсальных навыков. Соответствие дисциплин вершинам графа представлено в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие дисциплин вершинам графа

Наименование дисциплины	Номер вершины графа
Иностранный язык	1
Русский язык	2
История	3
Философия	4
Психология	5

Наличие ребра между двумя дисциплинами указывает на существование тесной связи между дисциплинами в подаче изучаемого материала, наличие общих подходов к решению педагогических проблем.

В табл. 2 представлены выборочные средние показателей интереса по разным дисциплинам. Здесь M — среднее; D — оценка стандартного отклонения на основании смещенной оценки дисперсии; S — оценка стандартного отклонения на основании несмещенной оценки дисперсии.

Таблица 2

Выборочные средние по показателю интереса

№	Дисциплина	M	D	S
1	Иностранный язык	7,50	2,20	2,20
2	Русский язык	6,26	2,40	2,40
3	История	6,42	2,70	2,70
4	Философия	6,46	2,50	2,50
5	Психология	6,87	2,50	2,60

Значения ρ и τ_B , представленные в табл. 3, показывают степень согласованности оценок студентов, а также взаимозависимость между дисциплинами.

Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции

Ряд 1	Ряд 2	ρ	τ_B
1	2	0,34	0,30
1	3	0,02	0,06
1	4	0,44	0,39
1	5	0,44	0,42
2	3	0,29	0,27
2	4	0,35	0,32
2	5	0,37	0,33
3	4	0,42	0,35
3	5	0,19	0,15
4	5	0,68	0,62

Уровни значимости коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и Кендалла представлены в табл. 4.

Визуальное представление результатов позволяет выявить ключевые взаимосвязи между дисциплинами, что способствует глубинному анализу и оптимизации образовательного процесса. На рис. 1 представлена структура межпредметных связей по субъективной оценке показателя вовлеченности студентов в учебный процесс.

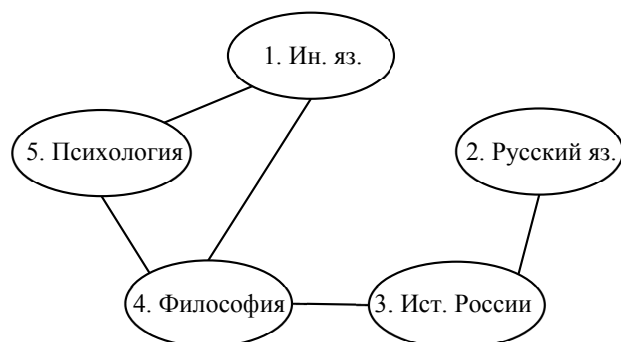


Рис. 1. Граф межпредметных связей дисциплин гуманитарного аспекта в сфере вовлеченности

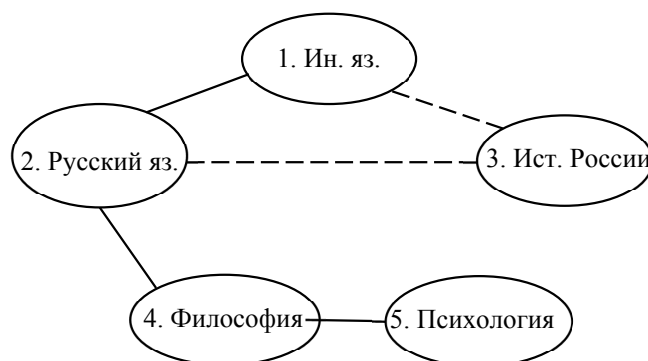


Рис. 2. Граф межпредметных связей дисциплин гуманитарного аспекта в сфере общности подходов

В ходе экспериментального исследования студентам второго курса был также предложен список вопросов, связанных с соответствием учебным потребностям и удовлетворенностью обучающихся касательно дисциплин гуманитарного направления. Статистика полученных показателей по некоторым важнейшим критериям приведена в табл. 5–8.

На рис. 2 представлен граф, описывающий структуру межпредметных связей по субъективной оценке показателей общности подходов к образовательной деятельности.

Таблица 4

Значимость коэффициентов ранговой корреляции при $n = 26$

α	ρ	τ_B
$\alpha = 0,01$	$\rho_{crit} = \sqrt{1 - \frac{n-2}{n-2+t_{crit}^2(\alpha, n-2)}} = 0,61$	$\tau_{crit} = \text{erf}^{-1}(1-\alpha) \sqrt{\frac{4(2n+5)}{9n(n-1)}} = 0,46$
$\alpha = 0,05$	$\rho_{crit} = \sqrt{1 - \frac{n-2}{n-2+t_{crit}^2(\alpha, n-2)}} = 0,53$	$\tau_{crit} = \text{erf}^{-1}(1-\alpha) \sqrt{\frac{4(2n+5)}{9n(n-1)}} = 0,39$

Таблица 5

Критерий ясности требований преподавателя к работе над учебным материалом

Дисциплина	Среднее	Стандартное отклонение
Иностранный язык	8,04	2,55
Русский язык и культура речи	7,96	2,82
История России	8,04	2,44
Философия	7,19	2,56
Психология	7,62	2,59

Таблица 6

Критерий удовлетворенности логической последовательностью изложения материала

Дисциплина	Среднее	Стандартное отклонение
Иностранный язык	7,85	2,43
Русский язык и культура речи	7,88	2,53
История России	7,31	2,81
Философия	6,96	3,21
Психология	7,35	2,58

Таблица 7

Критерий соответствия заданий учебным потребностям

Дисциплина	Среднее	Стандартное отклонение
Иностранный язык	7,23	2,42
Русский язык и культура речи	6,92	2,95
История России	5,81	3,20
Философия	5,42	2,72
Психология	6,50	2,42

Таблица 8

Критерий удовлетворенности индивидуальными консультациями

Дисциплина	Среднее	Стандартное отклонение
Иностранный язык	5,69	3,52
Русский язык и культура речи	5,73	3,52
История России	6,42	3,50
Философия	5,96	3,00
Психология	3,85	3,22

Применение корреляционного анализа и методов теории графов позволило установить, что дисциплины гуманитарного направления преподаются не разрозненно. В частности, в преподавательской деятельности касательно дисциплин «Философия» и «Психология» созданы общие

подходы (корреляционные связи: $\rho > 0,8$), а также касательно дисциплин «Иностранный язык» и «Русский язык» (корреляционные связи: $\rho > 0,8$). Кроме того, в преподавании истории России, иностранного языка и русского языка прослеживаются корреляционные зависимости, т. е. в целом демонстрируются общие принципы учебной деятельности в противоположность хаотичности и разрозненности (рис. 2).

Заключение

Для построения модели интеркоммуникации между преподавателями соответствующих кафедр и студентами был разработан алгоритм и написана программа на языке Вольфрам, позволяющая выявить структурные элементы образовательного процесса и визуализировать их исследуемые бинарные отношения с помощью нагруженных графов.

В построенных графах были выявлены доминирующие множества, внутренне устойчивые множества и клики вершин, что позволило в дальнейшем исследовать соответствующую группу дисциплин как систему с некоторыми ядрами.

В ходе исследования была создана имитационная модель образовательного процесса для указанной системы дисциплин на языке Вольфрам.

Корреляционные связи выявили более тесную взаимосвязь между дисциплинами «Иностранный язык», «Психология» и «Философия», чем между дисциплинами «Русский язык» и «История», что свидетельствует о наличии по крайней мере двух групп учащихся, предъявляющих различные требования к образовательному процессу.

Исходя из результатов обработки таблиц статистических оценок можно сделать вывод, что у более 70 % учащихся имеет место вовлеченность в образовательный процесс в университете, что проявилось в активности и интересе к исследованию. Активная группа студентов заинтересовалась окончательными результатами статистической обработки эксперимента. При этом также проявился интерес к повышению таких показателей, как логичность, структурированность и четкость представления изучаемых тем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зинченко В. О. Мониторинг качества учебного процесса в вузе: результаты эксперимента // Вестник Костромского государственного университета имени Н. А. Некрасова. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. 2016. Т. 22, № 4. С. 188–192.
2. Галиахметова А. Т., Айтуганова Ж. И. Эффективное управление качеством образования в вузе на основе интеграции традиционных и дистанционных форм контроля // Вестник Костромского государственного университета имени Н. А. Некрасова. Серия: Педагогика. Психология. Социальная работа. Ювенология. Социокинетика. 2015. Т. 21, № 1. С. 92–94.
3. Волокобинский М. Ю., Пекарская О. А. Методика прогнозирования итоговой успеваемости обучающихся в зависимости от различных факторов // CONTINUUM. Математика. Информатика. Образование. 2024. № 1 (33). С. 43–50. DOI: 10.24888/2500-1957-2024-1-43-50.
4. Глухов А. П., Ли А. С., Соломина И. Г. Мониторинг уровней и профилей цифровой грамотности обучающихся в региональной системе образования: анализ цифровых разрывов // Перспективы науки и образования. 2023. № 6 (66). С. 532–547. DOI: 10.32744/pse.2023.6.31.
5. Портнова А. Г., Лесникова С. Л., Русакова Н. А. Использование математических методов для мониторинга качества успеваемости студентов // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки. 2020. Т. 4, № 3 (15). С. 218–226. DOI: 10.21603/2542-1840-2020-4-3-218-226.
6. Боровков А. А. Математическая статистика: учебник. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010. 704 с.
7. Bursian E. Y., Demin A. M., Glukhov A. P. Recognition of Manuscript Tables in Computer Processing of Technical Transport Documentation // Proceedings of Models and Methods of Information Systems Research Workshop in the frame of the Betancourt International Engineering Forum (MMISR 2019), (Saint Petersburg, Russia, 04–05 December 2019). CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2556. Pp. 10–14. DOI: 10.24412/1613-0073-2556-10-14.
8. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение = Deep Learning / пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд., испр. М.: ДМК Пресс, 2018, 652 с.
9. Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
10. Бурсиан Е. Ю., Ушакова Т. И., Шефнер А. Ю. Корреляционная модель мониторинга качества образовательного процесса в высшем учебном заведении // V Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов (Санкт-Петербург, Россия, 29 ноября — 01 декабря 2023 г.): в 2 т. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2023. С. 139–145.

Дата поступления: 20.05.2025

Решение о публикации: 21.05.2025

The Structural Principle for Monitoring the Teaching of Humanities Disciplines

- Elena Yu. Bursian** — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Higher Mathematics. Research interests: handwriting recognition, neural networks, mathematical modelling using graph theory. E-mail: bursianeu@mail.ru
- Diana D. Mineeva** — 2nd year student of the direction 10.05.03 Information security of automated systems. Research interests: information security, neural networks. E-mail: i4160@mail.ru
- Tamara I. Ushakova** — Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics. Research interests: handwriting recognition, neural networks, mathematical modelling using graph theory. E-mail: ushakova960@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Bursian E. Yu., Mineeva D. D., Ushakova T. I. The Structural Principle for Monitoring the Teaching of Humanities Disciplines. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 50–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-50-57. (In Russian)

Abstract. This paper presents a statistical analysis based on a survey of students' attitudes towards certain humanities subjects. **Purpose:** to identify the structural links between different disciplines and the various types of students' goal orientation. **Methods:** rank correlation coefficient-based statistical techniques were used. **Results:** an experimental learning model has been developed for a cycle of the university humanities disciplines, providing a qualitative analysis of pedagogical activity. The constructed model is based on probabilistic and statistical methods of graph theory. A set of programmes has been developed for the model to function in the Wolfram language. There has been a notable increase in student interest in managing their own learning activities, as well as in creating the conditions for improvement and establishing the necessary links between participants in educational activities. **Practical significance:** the developed model enables participants in the educational process, particularly students, to actively engage with university educational activities.

Keywords: monitoring of learning, Spearman's correlation coefficient, Kendall's correlation coefficient, structural model, sample mean

REFERENCES

1. Zinchenko V. O. Monitoring kachestva uchebnogo protsessa v vuze: rezultaty eksperimenta [Monitoring of Quality of Educational Process in a Higher Educational Institution: Results of Experiment], *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N. A. Nekrasova. Seriya: Pedagogika. Psikhologiya. Sotsiokinetika* [Vestnik of Nekrasov Kostroma State University. Series: Pedagogy. Psychology. Sociokinetics], 2016, Vol. 22, No. 4, Pp. 188–192. (In Russian)
2. Galiakhmetova A. T., Aytuganova Z. I. Effektivnoe upravlenie kachestvom obrazovaniya v vuze na osnove integratsii traditsionnykh i distantsionnykh form kontrolya [Effective Management of Quality of Education at a Higher Education Institution Based on the Integration of Traditional and Remote Forms of Control], *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N. A. Nekrasova. Seriya: Pedagogika. Psikhologiya. Sotsialnaya rabota. Yuvenologiya. Sotsiokinetika* [Vestnik of Nekrasov Kostroma State University. Series: Pedagogy. Psychology. Social Work. Juvenology. Sociokinetics], 2015, Vol. 21, No. 1, Pp. 92–94. (In Russian)
3. Volokobinskiy M. Yu., Pekarskaya O. A. Metodika prognozirovaniya itogovoy uspevaemosti obuchayushchikhsya v zavisimosti ot razlichnykh faktorov [The Methodology of Forecasting the Final Academic Performance of Students Depending on from Various Factors], *CONTINUUM. Matematika. Informatika. Obrazovanie* [CONTINUUM. Mathematics. Computer Science. Education], 2024, No. 1 (33), Pp. 43–50. DOI: 10.24888/2500-1957-2024-1-43-50. (In Russian)
4. Glukhov A. P., Lee A. S., Solomina I. G. Monitoring urovney i profiley tsifrovoy gramotnosti obuchayushchikhsya v regionalnoy sisteme obrazovaniya: analiz tsifrovyykh razryvov [Monitoring of Digital Literacy Levels and Profiles in the Regional Education System: Analysis of Digital Gaps], *Perspektivy nauki i obrazovaniya* [Perspectives of Science and Education], 2023, No. 6 (66), Pp. 532–547. DOI: 10.32744/pse.2023.6.31. (In Russian)
5. Portnova A. G., Lesnikova S. L., Rusakova N. A. Ispolzovanie matematicheskikh metodov dlya monitoringa kachestva uspevaemosti studentov [Mathematical Methods in Monitoring the Quality of Student Performance], *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye i obshchestvennye nauki* [Bulletin of Kemerovo State University. Series: Humanities and Social Sciences], 2020, Vol. 4, No.3 (15), Pp. 218–226. DOI: 10.21603/2542-1840-2020-4-3-218-226. (In Russian)
6. Borovkov A. A. Matematicheskaya statistika: uchebnik [Mathematical statistics: textbook]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2010, 704 p. (In Russian)
7. Bursian E. Y., Demin A. M., Glukhov A. P. Recognition of Manuscript Tables in Computer Processing of Technical Transport Documentation, *Proceedings of Models and Methods of Information Systems Research Workshop in the frame of the Betancourt International Engineering Forum (MMISR 2019), St. Petersburg, Russia, December 04–05, 2019. CEUR Workshop Proceedings*, 2020, Vol. 2556, Pp. 10–14. DOI: 10.24412/1613-0073-2556-10-14.

8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Glubokoe obuchenie [Deep Learning]. Moscow, DMK Press, 2018, 652 p. (In Russian)
9. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey [Deep Learning: A Dive into the World of Neural Networks]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2018, 480 p. (In Russian)
10. Bursian E. Y., Ushakova T. I., Shefner A. Y. Korrelyatsionnaya model monitoringa kachestva obrazovatel'nogo protsessa v vysshem uchebnom zavedenii [Correlation Model of Monitoring of the educational Process Quality in a Higher Educational Institution], *V Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov [Proceedings of the V Betancourt International Engineering Forum]*, Saint Petersburg, Russia, November 29 — December 01, 2023. Vol. 1. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University, 2023, Pp. 139–145. (In Russian)

Received: 20.05.2025

Accepted: 21.05.2025

УДК 519.688

О прогностической способности расширенной модели Кокса: сравнительный анализ

Микулик Илья Игоревич — аспирант кафедры «Высшая математика». Научные интересы: прикладная математика, программирование, анализ выживаемости, методы оптимизации, параллельные вычисления. E-mail: mikulik.ilia@gmail.com

Благовещенская Екатерина Анатольевна — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Высшая математика». Научные интересы: фундаментальная и прикладная алгебра, распараллеливание алгоритмов. E-mail: kblag2002@yahoo.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Микулик И. И., Благовещенская Е. А. О прогностической способности расширенной модели Кокса: сравнительный анализ // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 58–70. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-58-70

Аннотация. Представлено исследование, посвященное сравнительному анализу расширенной модели Кокса с современными методами анализа выживаемости. **Цель:** проведение сравнительного анализа прогностических способностей расширенной модели Кокса с актуальными моделями и методами анализа выживаемости. Для достижения цели использованы методы машинного обучения (случайный лес выживаемости, градиентный бустинг, метод опорных векторов) и классические статистические подходы (модели Вейбулла, логлогистическая и логнормальная модели). **Методы:** анализ трех наборов данных: пациентов с раком предстательной железы, данных о рецидивах преступлений и пациентов с раком молочной железы. **Результаты:** демонстрируют, что расширенная модель Кокса превосходит или сопоставима по точности с современными методами машинного обучения, сохраняя при этом высокую интерпретируемость. **Практическая значимость:** заключается в возможности применения расширенной модели Кокса в медицине, социальных науках и других областях, где важны как точность прогнозирования, так и понимание влияния факторов на риск наступления события. Научная новизна работы заключается в проведении первого сравнительного анализа расширенной модели Кокса с другими методами анализа выживаемости, что открывает новые возможности для улучшения и адаптации модели в будущих исследованиях. Исследование имеет важное значение для развития методов анализа выживаемости и их применения в прикладных задачах, способствуя повышению точности прогнозов и улучшению интерпретируемости результатов.

Ключевые слова: анализ выживаемости, модель Кокса, метаэвристические алгоритмы, муравьиный алгоритм, оптимизация

Благодарности. Авторы благодарят к. м. н. А. Ю. Кнеева за консультацию в области медицины и онкологии в ходе работы над исследованием

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Анализ выживаемости — класс статистических моделей и методов, использующихся для оценивания вероятности наступления некоторого терминального события, после которого объект выпадает из наблюдения. Одним из ключевых преимуществ применения моделей анализа выживаемости по сравнению с традиционными регрессионными моделями является возможность работы с цензурированными данными. Цензурированные данные — это информация об объекте, собранная до определенного момента времени, после которого объект выходит из поля наблюдения. После прекращения наблюдения исследователю неизвестно, случилось ли терминальное событие для данного объекта или нет [1]. В связи с этим методы находят широкое применение в прикладных областях науки, в том числе в медицине [2].

Одним из популярных методов анализа выживаемости является полупараметрическая регрессионная модель Кокса. В работе [3] представлен метод, позволяющий строить расширенную модель Кокса — модель из класса расширения модели Кокса, не уступающую или превосходящую по прогностическим способностям классическую модель Кокса. Однако требуется провести сравнительный анализ построенных моделей с другими моделями анализа выживаемости.

Цель работы — провести сравнительный анализ прогностических способностей расширенной модели Кокса с актуальными моделями и методами анализа выживаемости. Объектом настоящего исследования является расширенная модель Кокса — обобщение модели Кокса, функция риска которой включает аддитивную и мультипликативную комбинацию ковариатов. Предметом исследования является метаэвристический алгоритм построения расширенной модели Кокса. Сравнительный анализ проводится впервые, что и является научной новизной данного исследования.

Модели и методы анализа выживаемости

Модели и методы анализа выживаемости можно разделить на классические статистические модели

и модели машинного обучения [4]. Статистические модели можно разделить на непараметрические, параметрические и полупараметрические. К непараметрическим моделям относят метод кривых Каплана — Мейера и модель Нельсона — Аалена. К параметрическим моделям относят модель Вейбулла, частным случаем которой являются экспоненциальная модель, логлогистическая модель, логнормальная модель и некоторые другие [5]. К полупараметрическим моделям относят модель пропорциональных рисков Кокса.

Непараметрические модели используются для построения кривых выживаемости. Кривые оценивают вероятность наступления терминального события по временным интервалам и фокусируются на сравнении выживаемости между группами, а не на предсказании конкретных временных исходов для объекта наблюдения. По этой причине непараметрические модели не рассматриваются в данном сравнительном анализе.

Модель Вейбулла. Функция риска модели определяется как

$$\lambda(t, x, \beta) = \alpha t^{\alpha-1} \exp(\beta x),$$

где $\alpha > 0$ — заданный коэффициент;

x — вектор значений признаков;

β — вектор влияния признаков.

При $\alpha > 1$ функция риска монотонно возрастает. В случае, когда $\alpha = 1$, модель является экспоненциальной, поэтому экспоненциальная модель является частным случаем модели Вейбулла.

Несмотря на простоту, функция риска модели Вейбулла представляет собой не линейную зависимость, а экспоненциальную, поэтому она находит применение для описания нелинейных процессов в анализе выживаемости [6].

Логлогистическая модель. Функция риска модели определяется как

$$\lambda(t, x, \beta) = \frac{\exp(\beta x) k t^{k-1}}{1 + \exp(\beta x) t^k}.$$

В логлогистической модели предполагается, что время до наступления события имеет логлогисти-

ческое распределение. Логлогистическую модель используют, когда функция риска на выборке не является монотонной. Например, в исследованиях выживаемости пациентов после определенного лечения [7].

Логнормальная модель. Она основана на предположении, что логарифм времени до события подчиняется нормальному распределению. Функция риска модели определяется как

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{S(t)};$$

$$f(t) = \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right);$$

$$S(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right).$$

Логнормальная модель достаточно гибкая и подходит для сложноструктурированных данных [8].

Для решения задач анализа выживаемости используют также и модели искусственного интеллекта. Методы машинного обучения нацелены на оценивание времени наступления события и дают меньше представления о характере распределения риска, а также о значимости признаков при построении прогноза.

Случайный лес выживаемости. Одним из современных и эффективных методов искусственного интеллекта, применяемых в анализе выживаемости, является случайный лес выживаемости. Этот метод представляет собой адаптацию классического алгоритма случайного леса для задач, связанных с анализом времени до наступления событий, таких как отказы оборудования, рецидивы заболеваний и другие. Основная идея метода заключается в рекурсивном разделении данных на подгруппы на основе определенного критерия разбиения, такого как максимизация различий в функциях выживаемости между группами. После разделения схожие объекты объединяются в узлы, что позволяет модели эффективно учитывать сложные зависимости между ковариатами.

Случайный лес выживаемости обладает рядом преимуществ, включая устойчивость к переобуче-

нию, способность работать с данными, содержащими пропущенные значения, и возможность обработки как категориальных, так и непрерывных переменных. Благодаря своей гибкости и высокой точности случайный лес выживаемости стал одним из наиболее популярных и широко используемых методов машинного обучения в задачах анализа выживаемости [9].

Градиентный бустинг. Является одним из наиболее популярных и гибких методов машинного обучения, который успешно применяется в задачах анализа выживаемости. Этот метод основан на идее последовательного построения ансамбля слабых моделей (обычно деревьев решений), где каждая последующая модель корректирует ошибки предыдущих. В контексте анализа выживаемости градиентный бустинг адаптируется для работы с цензурированными данными и временными событиями, что делает его особенно полезным для прогнозирования времени до наступления определенного исхода.

Одним из ключевых преимуществ градиентного бустинга является его способность учитывать сложные нелинейные зависимости между признаками и временем выживаемости. Однако у градиентного бустинга есть и свои недостатки. Во-первых, он требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при работе с большими объемами данных. Во-вторых, интерпретируемость модели может быть затруднена из-за сложности ансамбля деревьев. Тем не менее градиентный бустинг остается одним из наиболее популярных методов в задачах анализа выживаемости, особенно в таких областях, как медицина, финансы и инженерия, где важны точные прогнозы и учет сложных взаимосвязей между переменными.

Метод опорных векторов. Для решения задач анализа выживаемости также применяется метод опорных векторов (SVM). Хотя изначально этот метод был разработан для задач классификации, он может быть модифицирован и адаптирован для решения задач регрессии, а также для анализа выживаемости [10]. В контексте анализа выживаемости метод опорных векторов использует подход, основанный на максимизации различий между класса-

ми, что позволяет модели эффективно разделять данные на группы с различными характеристиками выживаемости.

Однако, несмотря на свою универсальность, метод опорных векторов имеет ряд ограничений применительно к задачам анализа выживаемости. Основным недостатком является то, что стандартные реализации SVM не учитывают информацию об упорядоченности объектов, особенно в случаях цензурированных данных (например, когда время наступления события неизвестно для части наблюдений). Это приводит к потере важной информации о временных зависимостях и может снижать точность модели [11].

Несмотря на это, метод опорных векторов продолжает использоваться в задачах анализа выживаемости, особенно в случаях, когда данные имеют сложную структуру или требуется высокая точность классификации. Его применение особенно актуально в медицине, биоинформатике и других областях, где важна интерпретация сложных взаимосвязей между переменными [12].

Модели машинного обучения, как правило, показывают лучший результат, чем классические статистические модели, ввиду усложненной зависимости функции риска от признаков [13]. Функциональная зависимость, как правило, является «черным ящиком»: механизм работы модели скрыт от экспериментатора [14].

Модель Кокса. Одной из наиболее популярных моделей анализа выживаемости [15] является регрессионная модель пропорциональных рисков Кокса. Она относится к классу полупараметрических моделей. Функция риска для модели Кокса описывается в следующем виде:

$$\lambda(t, x, \beta) = \lambda_0(t) \exp(\beta x). \quad (1)$$

Полупараметрическая модель Кокса, включающая использование параметрического и непараметрического подходов, позволяет получить более согласованные оценки в широком диапазоне условий по сравнению с параметрическими моделями и более точные оценки по сравнению с непараметрическими методами [16]. В отличие от параметрических методов, для модели Кокса не требуется информация

о распределении времени наступления терминального события, однако предполагается, что линейная комбинация признаков коррелирует с функцией риска экспоненциально.

Важным механизмом работы регрессионной модели пропорциональных рисков Кокса является допущение о базовом риске, представленном в виде функции $\lambda_0(t)$ в функции риска. Он является функцией, зависящей от времени, и представляет собой кривую, связывающую частоту наступления терминального события и время. Важным является то, что форма функции базового риска опасности не имеет значения: она может быть возрастающей, убывающей, иметь или не иметь экстремумы. Фактически для расчета коэффициента пропорциональности Кокса не требуется знаний о форме или свойствах базового риска — она может иметь любое распределение.

Модель Кокса получила широкое распространение в медицине [17], бизнесе [18], экономике [19], биотехнологии [20], биологии [21], социальных науках [22], в исследованиях аппаратной отказоустойчивости [23].

Каждая из моделей имеет свои преимущества и недостатки. Параметрические модели не учитывают сложные зависимости между признаками и функцией риска, а сложные модели искусственного интеллекта слабо поддаются интерпретации. Также вклад признаков и функция риска могут коррелировать различным образом в зависимости от характеристик используемых данных. Это обуславливает необходимость применения методов, способных адаптироваться к специфике конкретного набора данных и строить модели анализа выживаемости, учитывающие уникальные зависимости и закономерности, присущие исследуемой выборке.

Оценка прогностической способности

Одним из наиболее распространенных показателей для оценки качества прогнозов моделей анализа выживаемости является индекс соответствия Харрелла (с-индекс) [24]. Этот показатель учитывает как наблюдаемые события, так и цензурированные данные, что делает его универсальным

инструментом для оценки моделей [25]. *c*-индекс количественно измеряет ранговую корреляцию между фактическим временем выживания и предсказанными значениями модели. Он рассчитывается как отношение числа правильно упорядоченных (согласованных) пар объектов к общему числу сопоставимых пар [26].

Для формального определения *c*-индекса рассмотрим случайные величины T_1 и T_2 , которые представляют время наступления терминальных событий для двух объектов из набора данных, а также $\hat{T}_1$ и $\hat{T}_2$ — соответствующие предсказанные значения времени, полученные с помощью модели. Тогда *c*-индекс может быть выражен как вероятность того, что предсказанные значения сохраняют порядок относительно реальных временных данных [27]:

$$c = P(\hat{T}_1 < \hat{T}_2 | T_1 < T_2).$$

Индекс соответствия Харрелла обладает рядом важных преимуществ:

1. Интуитивная интерпретация: значение *c*-индекса лежит в диапазоне от 0 до 1, где 1 указывает на идеальное соответствие прогнозов модели реальным данным, а значения, близкие к 0, свидетельствуют о полном несоответствии.

2. Удобство анализа: вероятностная природа индекса упрощает интерпретацию результатов. Чем выше значение *c*-индекса, тем лучше прогностические свойства модели.

3. Сравнимость: индекс позволяет сравнивать эффективность различных моделей между собой, а также оценивать пригодность наборов данных для построения моделей анализа выживаемости.

Благодаря своей универсальности и простоте интерпретации *c*-индекс широко используется в научных исследованиях, что подтверждается его применением в работах [28–30] и других.

Расширенная модель Кокса и метод ее построения

В работе [3] представлен класс моделей, функция риска которой имеет вид

$$\lambda(t, x, \beta) = \lambda_0(t) \exp(g(\beta, x)). \quad (2)$$

При $g(\beta, x) = \beta x$ функция риска становится идентичной функции риска (1) регрессионной модели Кокса. Таким образом, модель Кокса является частным случаем класса моделей, функция риска которых описывается формулой (2), поэтому представленный класс моделей называется расширением модели Кокса. Модель из класса расширения моделей называется расширенной.

Также в работе [3] предлагается использовать полиномиальную зависимость ковариатов, каждый из которых может иметь как аддитивную, так и мультипликативную связь.

Пусть $P(\hat{F})$ — полином, составленный из признаков $f \in \hat{F}$:

$$P(\hat{F}) = \sum_{i=1}^{|\xi|} \varphi_i \prod_{j=1}^{|\hat{F}|} f_j^{\xi_{ij}}, \quad (3)$$

где $\xi = \left\{ \left(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{|\hat{F}|} \right) \right\}$, $\xi_{ij} \in \{0; 1\}$ — множество всех битовых векторов, каждый элемент которого — индикатор вхождения *j*-го признака в *i*-е слагаемое полинома,

$\varphi_i \in \{0; 1\}$ — маркер, указывающий вхождение *i*-го монома в P .

Составленный таким образом полином $P(\hat{F})$ является суммой одночленов, каждый из которых является произведением признаков. Исходя из определения (3) видно, что каждый полином однозначно описывается двумя множествами, достаточными для его построения, — ξ и $\hat{F}$.

$g(\hat{\beta}, X_i)$ с полиномом (3) представима в виде

$$g(\hat{\beta}, X_i) = \sum_{j=1}^{|\xi|} \hat{\beta}_j \varphi_j \prod_{k=1}^{|\hat{F}|} X_{il}^{\xi_{jk}} | l : \hat{F}_k = F_l. \quad (4)$$

Функция риска $\lambda(t, x, \beta)$, представленная через (4), названа аддитивно-мультипликативной, так как значение каждого признака в ней может входить либо в состав суммы, либо в состав произведения. Построение функции является задачей оптимизации, которая может быть решена с помощью метаэвристических алгоритмов.

Метаэвристические алгоритмы — это обобщенные стратегии поиска решений, которые используются для решения оптимизационных задач, позволяющие находить близкие к оптимальным решения

за приемлемое в рамках задачи время. Для построения расширенной модели Кокса используется алгоритм муравьев-опылителей. Метод основан на гибридном методе муравьиной колонии и генетическом алгоритме, адаптированном под поставленную задачу. Особенностью алгоритма является преобразование набора вершин графа, представляющих признаки или их произведение в модели. Алгоритм имитирует процесс опыления и размножения цветковых растений с помощью насекомых-опылителей. Алгоритм состоит из трех частей: муравьиный алгоритм, используемый для построения модели; генетический алгоритм, используемый для улучшения работы муравьиного алгоритма; алгоритм опыления, используемый для отбора признаков или их произведения. Первые два этапа — гибридный алгоритм, представленный ниже.

Результатом работы алгоритма является расширенная модель Кокса, функция риска которой основывается на построенном полиноме $P(\hat{F})$. Каждый моном, входящий в сумму полинома, представлен в алгоритме цветком. Множество цветов образует граф, путь по которому строят муравьи-опылители. Каждый муравей составляет множество цветов, сумма соответствующих мономов которых образует полином $P(\hat{F})$. Оценкой построенного муравьем пути является фитнес-функция, которая зависит от c -индекса, а также от количества входящих в нее признаков:

$$f(S, P_q(\hat{F})) = \omega_1 c(S, P_q(\hat{F})) - \omega_2 \frac{|\hat{F}|}{p} - \omega_3 K_q - \omega_4 B_q,$$

где $c(S, P_q(\hat{F}))$ — c -индекс расширенной модели Кокса с полиномом $P_q(\hat{F})$, обученной на наборе данных S ;

p — количество признаков;

K_q, B_q — числовые характеристики, оценивающие сложность полинома;

$\omega_{1...4}$ — балансирующие коэффициенты.

Муравьиный этап алгоритма представляет собой адаптированный к задаче простой муравьиный алгоритм. Правило выбора вершины адаптировано для задачи:

$$p_v^k(t) = \frac{\tau_v^{\alpha_k}(t) \eta_v^{\beta_k}}{\sum_u \tau_u^{\alpha_k}(t) \eta_u^{\beta_k}}, \quad (5)$$

где $p_v^k(t)$ — вероятность выбора цветка v муравьем k на итерации t ;

$\tau_v(t)$ — количество отложенного феромона на цветке v на итерации t ;

η_v — эвристическая информация, которая вычисляется как $\eta_v = c(S, P_i \equiv v)$ — c -индекс расширенной модели Кокса, обученной на одном мономе цветка v .

Правило откладывания феромона также адаптировано:

$$\Delta \tau_{kv} = \frac{Q_k}{f(S, P_q(\hat{F}))},$$

где $P_q(\hat{F})$ — полином, построенный муравьем k , а f — целевая функция.

При этом правило глобального изменения феромона вместе с испарением выглядит как

$$\tau_v(t) = \rho \tau_v(t) + \sum_k \Delta \tau_{kv}. \quad (6)$$

Вторым этапом гибридного алгоритма является приложение генетического алгоритма. В данном алгоритме этот этап не отличается от генетического этапа гибридного алгоритма, кроме адаптации правила оператора селекции:

$$p_i = \frac{f(S, P_i(\hat{F}))}{\sum_j f(S, P_j(\hat{F}))}. \quad (7)$$

Феромоны, оставленные на вершинах-цветках, также используются на этапе опыления. Этап опыления реализован в виде приложения четырех операторов на популяцию цветов — селекции, кроссбридинга, лайнбридинга и старения. Каждый цветок кроме хранимого значения вершины-монома имеет параметр «возраст». Оператор селекции выбирает цветы с наибольшей концентрацией феромонов. Оператор кроссбридинга с некоторой вероятностью вводит новые цветы, моном которых представляет произведение объединения признаков из мономов цветов-родителей:

$$v_i = (e_i, \tau_i, \eta_i, o_i);$$

$$v_i v_j = v_k;$$

$$v_k = \left(\begin{array}{l} e_k = \prod_{f_q \in e_i \cup e_j} f_q, \tau_k = \frac{\tau_i + \tau_j}{2}, \\ \eta_k = c(S, P \equiv e_k), o_k = o_{\max} \end{array} \right), \quad (8)$$

где e — моном нового цветка;

τ — количество феромона, отложенного на цветок;

η — эвристическая составляющая;

o — возраст цветка;

$o_{\max}$ — установленная продолжительность жизни цветка.

Если в результате преобразования появились цветы, уже находящиеся в популяции, то новые цветы не создаются, а обновляется возраст у имеющих цветы. Оператор лайнбридинга с небольшой вероятностью добавляет в популяцию новый цветок с единственным признаком. Этот оператор используется для того, чтобы оставить возможность вытесненным признакам участвовать в работе алгоритма. Оператор старения понижает индикатор возраста у каждого цветка. Если индикатор старения стал равен нулю, цветок выбывает из популяции.

Алгоритм можно представить в виде шагов:

Начало

1. Определить параметры $n, \tau_0, \rho, o_{\max}, \alpha_0, \beta_0, Q_0$.
2. Положить $c = 0, P = \emptyset$.
3. Положить множество цветов

$$V = \{v_i = \left(\begin{array}{l} e_i = f_i, \tau_i = rand(0, \tau_0), \\ \eta_i = c(S, P_i \equiv f_i), o_i = o_{\max} \end{array} \right) | \forall f_i \in F\}.$$

4. Положить множество муравьев

$$A = \{a_k = (\alpha_k = \alpha_0, \beta_k = \beta_0, Q_k = Q_0)\}.$$

5. Пока не достигнут критерий остановки:

- 5.1. Для каждого муравья $a_k \in A$:

$$5.1.1. E_k(t) = \{v_{\text{random}}\}.$$

$$5.1.2. c_k(t-1) = 0.$$

$$5.1.3. c_k(t) = \eta_i.$$

$$5.1.4. \text{Пока } c_k(t) > c_k(t-1):$$

$$5.1.4.1. \text{Выбрать } v \text{ в соответствии с правилом (5)}$$

$$5.1.4.2. E_k(t) = E_k(t) \cup \{v\}.$$

$$5.1.4.3. c_k(t-1) = c_k(t).$$

$$5.1.4.4. P_k = \sum_{i, v_i \in E_k(t)} e_i.$$

$$5.1.4.5. c_k(t) = f(S, P_k).$$

$$5.1.5. \text{Если } c_k(t) > c:$$

$$5.1.5.1. c = c_k(t).$$

$$5.1.5.2. P = P_k.$$

5.1.6. Для каждого $v_i \in E_k(t)$ вычислить $\Delta\tau_v(t)$ в соответствии с правилом (6).

5.2. Применить оператор выбора $A = S_{\text{selection}}(A)$ правилом (7).

5.3. Применить оператор кроссинговера $A = S_{\text{crossover}}(A)$.

5.4. Применить оператор мутации $A = S_{\text{mutation}}(A)$.

5.5. Применить оператор селекции цветов $V = S_{\text{selection}}(V)$.

5.6. Применить оператор кроссбридинга $V = S_{\text{crossbreeding}}(V)$ в соответствии с правилом (8).

5.7. Применить оператор лайнбридинга $V = S_{\text{linebreeding}}(V)$.

5.8. Применить оператор старения $V = S_{\text{aging}}(V)$.

6. Вернуть значения c, P .

Критерием остановки алгоритма может являться количество итераций или сходимость решений к одному значению. Таким образом, представленный метод оптимизации муравьев-опылителей решает задачу построения аддитивно-мультипликативной функции риска и отбора признаков для расширенной модели Кокса.

Результаты

Сравнение моделей и методов анализа выживаемости проведено на трех наборах данных: базе данных больных раком предстательной железы, наборе данных о рецидивах преступлений, базе данных больных раком молочной железы. Для сравнения были представлены два экземпляра класса расширения модели Кокса: расширенная модель с наибольшим c -индексом, со всеми ковариатами и модель с выборочным числом ковариатов, функция риска которой лучше поддается интерпретации.

Результаты сравнения моделей и методов анализа выживаемости на базе больных раком предстательной железы представлены в табл. 1. База данных больных раком предстательной железы содержит клинические данные пациентов, наблюдавшихся либо получавших лечение в ФГБУ «РНЦРХТ

им. ак. А. М. Гранова» Минздрава России в период с января 1996 по декабрь 2016 года [31]. В исследование включены обезличенные данные 5073 пациентов, у которых была доступна информация о степени распространенности опухолевого процесса.

Количество признаков в построенной модели Кокса со значимыми ковариатами составило 3 из возможных 7. Исходя из результатов в табл. 1, можно сделать вывод, что построенные расширенные модели Кокса показали лучший результат в сравнении с остальными использовавшимися моделями. При этом достаточно эффективной оказалась расширенная модель Кокса, построенная всего на трех из семи признаков.

Результаты сравнения моделей на наборе данных Rossi [32] о рецидивах преступлений представлены в табл. 2. Набор данных содержит информацию о 432 заключенных, которые были выпущены из тюрем штата Мэриленд в 1970-х годах и за которыми велось наблюдение в течение года после их освобождения.

Набор данных использован для модели по нескольким причинам. Существенным преимуществом является то, что он входит в библиотеку lifelines, с помощью которой были построены большинство моделей в текущем анализе. Также набор является типовым, а значит, результаты могут быть сравнены с результатами в других работах. Важным является то, что в наборе нет пропуска данных. Данные не содержат большого количества признаков, что снижает временные затраты на поиск оптимальных параметров.

Количество признаков в построенной модели Кокса со значимыми ковариатами составило 3 из возможных 9. На основании данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что наилучшая из разработанных расширенных моделей Кокса продемонстрировала незначительное превосходство по сравнению с результатами, полученными с использованием модели случайного леса для анализа выживаемости. Расширенная модель Кокса, обученная на трех признаках, показала менее высокие результаты, однако превзошла все остальные модели, включенные в анализ.

Результаты сравнения рассматриваемых моделей и методов на базе пациентов, больных раком

Таблица 1

Сравнение моделей и методов анализа выживаемости на базе больных раком предстательной железы

Модель/метод	c-индекс
Модель Кокса	0,8515
Модель Вейбулла	0,8500
Логлогистическая модель	0,8498
Логнормальная модель	0,8487
Случайный лес выживаемости	0,8517
Градиентный бустинг	0,8520
Метод опорных векторов	0,8234
Расширенная модель Кокса (все ковариаты)	0,8623
Расширенная модель Кокса (значимые ковариаты)	0,8562

Таблица 2

Сравнение моделей и методов анализа выживаемости на наборе данных о рецидивах преступлений

Модель/метод	c-индекс
Модель Кокса	0,6445
Модель Вейбулла	0,6401
Логлогистическая модель	0,6438
Логнормальная модель	0,6452
Случайный лес выживаемости	0,6649
Градиентный бустинг	0,6154
Метод опорных векторов	0,6041
Расширенная модель Кокса (все ковариаты)	0,6689
Расширенная модель Кокса (значимые ковариаты)	0,6557

молочной железы [33], представлены в табл. 3. Этот набор данных о пациентах с раком молочной железы был получен из программы SEER (Surveillance, Epidemiology, and End Results) Национального института рака (NCI) за ноябрь 2017 года, который предоставляет информацию о популяционной статистике онкологических заболеваний. Набор данных включает женщин с инфильтрирующим протоковым и дольковым раком молочной железы, диагностированным в период с 2006 по 2010 год. В исследование было включено 4024 пациента.

Количество признаков в построенной модели Кокса со значимыми ковариатами составило 6 из возможных 8. На основании данных, представленных в табл. 3, можно заключить, что наилучшая из разработанных расширенных моделей Кокса незначительно уступила методу опорных векторов. Расширенная модель Кокса, обученная на шести признаках, также уступила только этому методу, однако превзошла все остальные модели, рассмотренные в анализе.

Таблица 3

**Сравнение моделей и методов анализа
выживаемости на базе данных больных раком
молочной железы**

Модель/метод	c-индекс
Модель Кокса	0,6910
Модель Вейбулла	0,7025
Логлогистическая модель	0,7026
Логнормальная модель	0,7028
Случайный лес выживаемости	0,6996
Градиентный бустинг	0,7237
Метод опорных векторов	0,7281
Расширенная модель Кокса (все ковариаты)	0,7240
Расширенная модель Кокса (значимые ковариаты)	0,7238

Проведенное сравнение расширенных моделей Кокса с другими методами анализа выживаемости на трех наборах данных показало их высокую эффективность. На данных о раке предстательной железы и рецидивах преступлений расширенные модели Кокса, включая версии с ограниченным числом признаков, продемонстрировали превосходство над большинством альтернативных методов. На данных о раке молочной железы модель Кокса немного уступила методу опорных векторов, но осталась одной из наиболее результативных. Таким образом, расширенные модели Кокса подтвердили свою универсальность и высокую предсказательную способность, особенно при интерпретируемости функции риска.

Заключение

В статье проведен сравнительный анализ прогностических способностей расширенной модели Кокса с другими современными методами анализа выжи-

ваемости. Расширенная модель Кокса, представляющая собой обобщение классической модели Кокса, построена с использованием метаэвристического алгоритма муравьев-опылителей. Особенностью этих моделей является включение в функцию риска как аддитивных, так и мультипликативных комбинаций ковариатов. Это, с одной стороны, обеспечивает высокую точность прогнозирования, с другой — сохраняет интерпретируемость результатов.

Результаты исследования, проведенного на трех различных наборах данных (рак предстательной железы, рецидивы преступлений и рак молочной железы), показали, что расширенная модель Кокса демонстрирует конкурентоспособные результаты в сравнении с классическими статистическими моделями анализа выживаемости и методами машинного обучения. В частности, на данных о раке предстательной железы и рецидивах преступлений расширенная модель Кокса превзошла большинство альтернативных методов. На данных о раке молочной железы расширенная модель Кокса показала результаты, близкие к методу опорных векторов, сохранив при этом свою интерпретируемость, что подтверждает ее универсальность и возможность применения в прикладных областях.

Таким образом, расширенная модель Кокса представляет собой эффективный инструмент для анализа выживаемости, сочетающий в себе высокую прогностическую способность и интерпретируемость. Результаты исследования подтверждают возможность дальнейшего развития и применения метода построения данной модели в прикладных задачах, особенно в медицине и социальных науках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Летчиков А. В., Матвеев Р. Ю., Широбокова М. А. Решение проблемы цензурированных данных при моделировании оценки индивидуального кредитного риска // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2019. Т. 29, Вып. 1. С. 34–41.
2. Heterogeneous Datasets for Federated Survival Analysis Simulation / A. Archetti, E. Lomurno, F. Lattari [et al.] // ICPE '23 Companion: Companion of the ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (Coimbra, Portugal, 15–19 April 2023). New York (NY): Association for Computing Machinery, 2023. Pp. 173–180. DOI: 10.1145/3578245.3584935.
3. Микулик И. И., Жаринов Г. М., Кнеев А. Ю. Алгоритм построения функции риска расширенной модели Кокса и его применение на базе данных больных раком предстательной железы // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2024. Т. 24, № 4. С. 413–423. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-4-413-423.
4. Wang P., Li Y., Reddy C. K. Machine Learning for Survival Analysis: A Survey // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 51, Iss. 6. Art. No. 110. 36 p. DOI: 10.1145/3214306.

5. Overview of Parametric Survival Analysis for Health-Economic Applications / K. J. Ishak, N. Kreif, A. Benedict, N. Muszbek // *PharmacoEconomics*. 2013. Vol. 31, Iss. 8. Pp. 663–675. DOI: 10.1007/s40273-013-0064-3.
6. Zhu S., Campanella O., Chen G. Estimation of Parameters in the Weibull Model from Microbial Survival Data Obtained Under Constant Conditions with Come-up Times // *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 292. Art. No. 110364. 10 p. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110364.
7. Borges P. Estimating the Turning Point of the Log-Logistic Hazard Function in the Presence of Long-Term Survivors with an Application for Uterine Cervical Cancer Data // *Journal of Applied Statistics*. 2021. Vol. 48, Iss. 2. Pp. 203–213. DOI: 10.1080/02664763.2020.1720627.
8. Extrapolation of Survival Curves Using Standard Parametric Models and Flexible Parametric Spline Models: Comparisons in Large Registry Cohorts with Advanced Cancer / J. Gray, T. Sullivan, N. R. Latimer [et al.] // *Medical Decision Making*. 2021. Vol. 41, Iss. 2. Pp. 179–193. DOI: 10.1177/0272989X20978958.
9. Decision Tree for Competing Risks Survival Probability in Breast Cancer Study / N. A. Ibrahim, A. Kudus, I. Daud, M. R. Abu Bakar // *International Journal of Biological and Medical Sciences*. 2008. Vol. 3, Iss. 1. Pp. 25–29.
10. Support Vector Machines for Survival Analysis / V. Van Belle, K. Pelckmans, J. A. K. Suykens, S. Van Huffel // *Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence in Medicine and Healthcare (CIMED2007)*, (Plymouth, United Kingdom, 25–27 July 2007). 8 p.
11. Shivaswamy P. K., Chu W., Jansche M. A Support Vector Approach to Censored Targets // *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2007)* (Omaha, NE, USA, 28–31 October 2007). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. Pp. 655–660. DOI: 10.1109/ICDM.2007.93.
12. Integrating Bioinformatics and Machine Learning Methods to Analyze Diagnostic Biomarkers for HBV-induced Hepatocellular Carcinoma / A. Yang, J. Liu, M. Li [et al.] // *Diagnostic Pathology*. 2024. Vol. 19, Iss. 1. Art. No. 105. 10 p. DOI: 10.1186/s13000-024-01528-8.
13. Deep Learning for Survival Analysis: A Review / S. Wiegrefe, P. Kopper, R. Sonabend [et al.] // *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57, Iss. 3. Art. No. 65. 34 p. DOI: 10.1007/s10462-023-10681-3.
14. Kovalev M. S., Utkin L. V. A Robust Algorithm for Explaining Unreliable Machine Learning Survival Models Using the Kolmogorov — Smirnov Bounds // *Neural Networks*. 2020. Vol. 132. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007.
15. Archetti A., Ieva F., Matteucci M. Scaling Survival Analysis in Healthcare with Federated Survival Forests: A Comparative Study on Heart Failure and Breast Cancer Genomics // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 149. Pp. 343–358. DOI: 10.1016/j.future.2023.07.036.
16. Powell J. L. Estimation of Semiparametric Models // *Handbook of Econometrics*. Volume IV / R. F. Engle, D. L. McFadden (eds.). Amsterdam: North-Holland Publishing, 1994. Pp. 2443–2521. DOI: 10.1016/S1573-4412(05)80010-8.
17. Assessing Performance and Clinical Usefulness in Prediction Models with Survival Outcomes: Practical Guidance for Cox Proportional Hazards Models / D. J. McLernon, D. Giardiello, B. Van Calster // *Annals of Internal Medicine*. 2023. Vol. 176, No. 1. Pp. 105–114. DOI: 10.7326/M22-0844.
18. Tao X., Wang M., Ji Y. The Application of Graph-Structured Cox Model in Financial Risk Early Warning of Companies // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Iss. 14. Art. No. 10802. 16 p. DOI: 10.3390/su151410802.
19. Gomez-Gonzalez J. E., Uribe J. M., Valencia O. M. Does Economic Complexity Reduce the Probability of a Fiscal Crisis? // *World Development*. 2023. Vol. 168. Art. No. 106250. 17 p. DOI: 10.1016/j.worlddev.2023.106250.
20. Viral Kinetics in Sylvatic Yellow Fever Cases / V. I. Avelino-Silva, M. V. Thomazella, M. P. Marmorato [et al.] // *The Journal of Infectious Diseases*. 2023. Vol. 227, Iss. 9. Pp. 1097–1103. DOI: 10.1093/infdis/jiac435.
21. Survival Analysis of Productive Life in Florida Dairy Goats Using a Cox Proportional Hazards Model / C. Ziadi, J. P. Sánchez, M. Sánchez [et al.] // *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2023. Vol. 140, Iss. 4. Pp. 431–439. DOI: 10.1111/jbg.12769.
22. High Social Risk and Mortality. A Prospective Study in Community-Dwelling Older Adults Living in a Rural Ecuadorian Village / O. H. Del Brutto, R. M. Mera, D. A. Rumbela [et al.] // *Preventive Medicine Reports*. 2023. Vol. 32. Art. No. 102146. 4 p. DOI: 10.1016/j.pmedr.2023.102146.
23. Papathanasiou D., Demertzis K., Tziritas N. Machine Failure Prediction Using Survival Analysis // *Future Internet*. 2023. Vol. 15, Iss. 5. Art. No. 153. 26 p. DOI: 10.3390/fi15050153.
24. Evaluating the Yield of Medical Tests / F. E. Harrell Jr., R. M. Califf, D. B. Pryor [et al.] // *JAMA: The Journal of the American Medical Association*. 1982. Vol. 247, No. 18. Pp. 2543–2546. DOI: 10.1001/jama.1982.03320430047030.
25. The Concordance Index Decomposition: A Measure for a Deeper Understanding of Survival Prediction Models / A. Alabdallah, M. Ohlsson, S. Pashami, T. Rögnvaldsson // *Artificial Intelligence in Medicine*. 2024. Vol. 148. Art. No. 102781. 10 p. DOI: 10.1016/j.artmed.2024.102781.

26. Pitfalls of the Concordance Index for Survival Outcomes / N. Hartman, S. Kim, K. He, J. D. Kalbfleisch // *Statistics in Medicine*. 2023. Vol. 42, Iss. 13. Pp. 2179–2190. DOI: 10.1002/sim.9717.
27. Румянцев Е. В., Фурманов К. К. Использование вневыборочных остатков Кокса — Снелл при прогнозировании наступления событий // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15, № 1. С. 7–18. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.7.18.
28. Longato E., Vettoretti M., Di Camillo B. A Practical Perspective on the Concordance Index for the Evaluation and Selection of Prognostic Time-to-Event Models // *Journal of Biomedical Informatics*. 2020. Vol. 108. Art. No. 103496. 9 p. DOI: 10.1016/j.jbi.2020.103496.
29. Pencina M. J., D’Agostino R. B. Overall C as a Measure of Discrimination in Survival Analysis: Model Specific Population Value and Confidence Interval Estimation // *Statistics in Medicine*. 2004. Vol. 23, Iss. 13. Pp. 2109–2123. DOI: 10.1002/sim.1802.
30. A Convolutional Neural Network Model for Survival Prediction Based on Prognosis-Related Cascaded Wx Feature Selection / Q. Yin, W. Chen, C. Zhang, Z. Wei // *Laboratory Investigation*. 2022. Vol. 102, Iss. 10. Pp. 1064–1074. DOI: 10.1038/s41374-022-00801-y.
31. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620331 Российская Федерация. База данных больных раком предстательной железы: опубл. 20.04.2016 / Г. М. Жаринов.
32. Rossi P. H., Berk R. A., Lenihan K. J. *Money, Work, and Crime: Experimental Evidence*. New York: Academic Press, 1980. 260 p.
33. Teng J. SEER Breast Cancer Data // *IEEE Dataport*. Last update 18.01.2019. DOI: 10.21227/a9qy-ph35.

Дата поступления: 03.03.2025

Решение о публикации: 07.03.2025

Comparative Analysis of the Predictive Ability of the Extended Cox Model

Ilya I. Mikulik

— Postgraduate Student of the Higher Mathematics Department. Research interests: applied mathematics, programming, survival analysis, optimization methods, parallel computing. E-mail: mikulik.ilia@gmail.com

Ekaterina A.
Blagoveshchenskaya

— Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor, the Head of the Higher Mathematics Department. Research interests: fundamental and applied algebra, parallelization of algorithms. E-mail: kblag2002@yahoo.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Mikulik I. I., Blagoveshchenskaya E. A. Comparative Analysis of the Predictive Ability of the Extended Cox Model. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 58–70. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-58-70. (In Russian)

Abstract. *A study presents a comparative analysis of the extended Cox model with modern survival analysis methods. **Purpose:** to evaluate the predictive abilities of the extended Cox model in comparison with the current survival analysis models and techniques. To achieve this goal, machine learning methods (survival random forest, gradient boosting, support vector machines) and classical statistical approaches (Weibull, log-logistic, and log-normal models) were used. **Methods:** analyzing three datasets, that is prostate cancer patients, data on their recurrent admissions, and breast cancer patients. **Results:** To demonstrate that the extended Cox model outperforms or is comparable in accuracy to modern machine learning methods while maintaining high interpretability. **Practical significance:** the applicability of the extended Cox model in medicine, social sciences, and other fields where both prediction accuracy and understanding of the factors affecting the risk of an event are crucial. The scientific novelty of this study lies in conducting a first comparative analysis of the extended Cox model with other survival analysis methods opening new opportunities for improving and*

adapting the model in future research. The study will be of great importance for the development of survival analysis methods and their application in practical tasks contributing to increased prediction accuracy and improved interpretability of results.

Keywords: survival analysis, Cox model, metaheuristic algorithms, ant colony algorithm, optimization

REFERENCES

1. Letchikov A. V., Matveev R. Yu., Shirobokova M. A. Reshenie problemy tsenzurirovannykh dannykh pri modelirovanii otsenki individualnogo kreditnogo riska [Solving the Problem of Censored Data in Modeling the Individual Credit Risk Estimation], *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya "Ekonomika i pravo"* [The Bulletin of Udmurt University. Series Economics and Law], 2019, Vol. 29, Iss. 1, Pp. 34–41. (In Russian)
2. Archetti A., Lomurno E., Lattari F., et al. Heterogeneous Datasets for Federated Survival Analysis Simulation, *ICPE '23 Companion: Companion of the ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (Coimbra, Portugal, April 15–19, 2023)*. New York (NY), Association for Computing Machinery, 2023, Pp. 173–180. DOI: 10.1145/3578245.3584935.
3. Mikulik I. I., Zharinov G. M., Kneev A. Yu. Algorithm for Constructing the Hazard Function of the Extended Cox Model and Its Application to the Prostate Cancer Patient Database, *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2024, Vol. 24, No. 4, Pp. 413–423. DOI: 10.23947/2687-1653-2024-24-4-413-423.
4. Wang P., Li Y., Reddy C. K. Machine Learning for Survival Analysis: A Survey, *ACM Computing Surveys*, 2019, Vol. 51, Iss. 6, Art. No. 110, 36 p. DOI: 10.1145/3214306.
5. Ishak K. J., Kreif N., Benedict A., Muszbek N. Overview of Parametric Survival Analysis for Health-Economic Applications, *PharmacoEconomics*, 2013, Vol. 31, Iss. 8, Pp. 663–675. DOI: 10.1007/s40273-013-0064-3.
6. Zhu S., Campanella O., Chen G. Estimation of Parameters in the Weibull Model from Microbial Survival Data Obtained Under Constant Conditions with Come-up Times, *Journal of Food Engineering*, 2021, Vol. 292, Art. No. 110364, 10 p. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110364.
7. Borges P. Estimating the Turning Point of the Log-Logistic Hazard Function in the Presence of Long-Term Survivors with an Application for Uterine Cervical Cancer Data, *Journal of Applied Statistics*, 2021, Vol. 48, Iss. 2, Pp. 203–213. DOI: 10.1080/02664763.2020.1720627.
8. Gray J., Sullivan T., Latimer N. R., et al. Extrapolation of Survival Curves Using Standard Parametric Models and Flexible Parametric Spline Models: Comparisons in Large Registry Cohorts with Advanced Cancer, *Medical Decision Making*, 2021, Vol. 41, Iss. 2, Pp. 179–193. DOI: 10.1177/0272989X20978958.
9. Ibrahim N. A., Kudus A., Daud I., Abu Bakar M. R. Decision Tree for Competing Risks Survival Probability in Breast Cancer Study, *International Journal of Biological and Medical Sciences*, 2008, Vol. 3, Iss. 1, Pp. 25–29.
10. Van Belle V., Pelckmans K., Suykens J. A. K., Van Huffel S. Support Vector Machines for Survival Analysis, *Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence in Medicine and Healthcare (CIMED2007)*, Plymouth, United Kingdom, July 25–27, 2007). 8 p.
11. Shivaswamy P. K., Chu W., Jansche M. A Support Vector Approach to Censored Targets, *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2007)*, Omaha, NE, USA, October 28–31, 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007, Pp. 655–660. DOI: 10.1109/ICDM.2007.93.
12. Yang A., Liu J., Li M., et al. Integrating Bioinformatics and Machine Learning Methods to Analyze Diagnostic Biomarkers for HBV-induced Hepatocellular Carcinoma, *Diagnostic Pathology*, 2024, Vol. 19, Iss. 1, Art. No. 105, 10 p. DOI: 10.1186/s13000-024-01528-8.
13. Wiegerebe S., Kopper P., Sonabend R., et al. Deep Learning for Survival Analysis: A Review, *Artificial Intelligence Review*, 2024, Vol. 57, Iss. 3, Art. No. 65, 34 p. DOI: 10.1007/s10462-023-10681-3.
14. Kovalev M. S., Utkin L. V. A Robust Algorithm for Explaining Unreliable Machine Learning Survival Models Using the Kolmogorov — Smirnov Bounds, *Neural Networks*, 2020, Vol. 132, Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007.
15. Archetti A., Ieva F., Matteucci M. Scaling Survival Analysis in Healthcare with Federated Survival Forests: A Comparative Study on Heart Failure and Breast Cancer Genomics, *Future Generation Computer Systems*, 2023, Vol. 149, Pp. 343–358. DOI: 10.1016/j.future.2023.07.036.

16. Powell J. L. Estimation of Semiparametric Models. In: Engle R. F., McFadden D. L. (eds.) *Handbook of Econometrics. Volume IV*. Amsterdam, North-Holland Publishing, 1994, Pp. 2443–2521. DOI: 10.1016/S1573-4412(05)80010-8.
17. McLernon D. J., Giardiello D., Van Calster B. Assessing Performance and Clinical Usefulness in Prediction Models with Survival Outcomes: Practical Guidance for Cox Proportional Hazards Models, *Annals of Internal Medicine*, 2023, Vol. 176, No. 1, Pp. 105–114. DOI: 10.7326/M22-0844.
18. Tao X., Wang M., Ji Y. The Application of Graph-Structured Cox Model in Financial Risk Early Warning of Companies, *Sustainability*, 2023, Vol. 15, Iss. 14, Art. No. 10802, 16 p. DOI: 10.3390/su151410802.
19. Gomez-Gonzalez J. E., Uribe J. M., Valencia O. M. Does Economic Complexity Reduce the Probability of a Fiscal Crisis? *World Development*, 2023, Vol. 168, Art. No. 106250, 17 p. DOI: 10.1016/j.worlddev.2023.106250.
20. Avelino-Silva V. I., Thomazella M. V., Marmorato M. P., et al. Viral Kinetics in Sylvatic Yellow Fever Cases, *The Journal of Infectious Diseases*, 2023, Vol. 227, Iss. 9, Pp. 1097–1103. DOI: 10.1093/infdis/jiac435.
21. Ziadi C., Sánchez J. P., Sánchez M., et al. Survival Analysis of Productive Life in Florida Dairy Goats Using a Cox Proportional Hazards Model, *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 2023, Vol. 140, Iss. 4, Pp. 431–439. DOI: 10.1111/jbg.12769.
22. Del Brutto O. H., Mera R. M., Rumbela D. A., et al. High Social Risk and Mortality. A Prospective Study in Community-Dwelling Older Adults Living in a Rural Ecuadorian Village, *Preventive Medicine Reports*, 2023, Vol. 32, Art. No. 102146, 4 p. DOI: 10.1016/j.pmedr.2023.102146.
23. Papathanasiou D., Demertzis K., Tziritis N. Machine Failure Prediction Using Survival Analysis, *Future Internet*, 2023, Vol. 15, Iss. 5, Art. No. 153, 26 p. DOI: 10.3390/fi15050153.
24. Harrell Jr. F. E., Califf R. M., Pryor D. B., et al. Evaluating the Yield of Medical Tests, *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, 1982, Vol. 247, No. 18, Pp. 2543–2546. DOI: 10.1001/jama.1982.03320430047030.
25. Alabdallah A., Ohlsson M., Pashami S., Rögnvaldsson T. The Concordance Index Decomposition: A Measure for a Deeper Understanding of Survival Prediction Models, *Artificial Intelligence in Medicine*, 2024, Vol. 148, Art. No. 102781, 10 p. DOI: 10.1016/j.artmed.2024.102781.
26. Hartman N., Kim S., He K., Kalbfleisch J. D. Pitfalls of the Concordance Index for Survival Outcomes, *Statistics in Medicine*, 2023, Vol. 42, Iss. 13, Pp. 2179–2190. DOI: 10.1002/sim.9717.
27. Rumyantseva E. V., Furmanov K. K. Using Out-of-Sample Cox — Snell Residuals in Time-to-Event Forecasting, *Business Informatics*, 2021, Vol. 15, No. 1, Pp. 7–18. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.7.18.
28. Longato E., Vettoretti M., Di Camillo B. A Practical Perspective on the Concordance Index for the Evaluation and Selection of Prognostic Time-to-Event Models, *Journal of Biomedical Informatics*, 2020, Vol. 108, Art. No. 103496, 9 p. DOI: 10.1016/j.jbi.2020.103496.
29. Pencina M. J., D'Agostino R. B. Overall C as a Measure of Discrimination in Survival Analysis: Model Specific Population Value and Confidence Interval Estimation, *Statistics in Medicine*, 2004, Vol. 23, Iss. 13, Pp. 2109–2123. DOI: 10.1002/sim.1802.
30. Yin Q., Chen W., Zhang C., Wei Z. A Convolutional Neural Network Model for Survival Prediction Based on Prognosis-Related Cascaded Wx Feature Selection, *Laboratory Investigation*, 2022, Vol. 102, Iss. 10, Pp. 1064–1074. DOI: 10.1038/s41374-022-00801-y.
31. Zharinov G. M. Baza dannykh bolnykh rakom predstatelnoy zhelezy [Prostate cancer patient database]. Certificate of State registration of the database RU No. 2016620331, published at April 20, 2016. (In Russian)
32. Rossi P. H., Berk R. A., Lenihan K. J. Money, Work, and Crime: Experimental Evidence. New York, Academic Press, 1980. 260 p.
33. Teng J. SEER Breast Cancer Data, *IEEE Dataport*. Last update January 18, 2019. DOI: 10.21227/a9qy-ph35.

Received: 03.03.2025

Accepted: 07.03.2025

УДК 656.073

Синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром

Ходаковский Валентин Аветикович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и информационная безопасность». Научные интересы: математическое моделирование, цифровая обработка сигналов, теория информации. E-mail: hva1104@mail.ru

Коротченко Владислав Дмитриевич — аспирант кафедры «Электрическая связь». Научные интересы: математическое моделирование, цифровая обработка сигналов, теория информации. E-mail: vladis147@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ходаковский В. А., Коротченко В. Д. Синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 71–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-71-82

Аннотация. Рассмотрена задача синтеза ортогонального базиса для передачи информационных сообщений по узкополосным каналам связи при наличии шума. **Цель:** разработка метода синтеза ортогонального базиса на конечном временном интервале для эффективной цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром, которая направлена на увеличение пропускной способности цифровых каналов связи. Для достижения цели использованы матричный метод синтеза и анализа сигналов, программа в среде MATLAB и другие инновационные подходы. **Методы:** теоретический анализ и компьютерное моделирование. **Результаты:** подтверждают высокий потенциал применения ортогонального базиса на конечном временном интервале для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром. **Практическая значимость:** заключается в улучшении качества передачи сигналов, особенно в условиях ограниченной полосы пропускания каналов связи, что способствует созданию более эффективных и надежных систем связи. **Обсуждение:** высказываются рекомендации по дальнейшему совершенствованию предложенного базиса, освещаются вопросы, требующие дальнейших исследований и разработок. Исследование имеет важное значение для развития телекоммуникационных технологий на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: разложение функции по базису, ортогональный базис, аппроксимация, синтез и анализ сигналов, цифровая обработка сигналов

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Одной из важнейших задач в теории связи является поиск сигналов с наилучшими автокорреляционными свойствами, чему посвящены работы [1–4].

В задачах передачи информационных сообщений по узкополосным каналам связи при наличии

шума также существует много проблем, одной из которых является межсимвольная интерференция, возникающая вследствие взаимного влияния гармоник смежных символов и выбора ортогонального базиса на бесконечном интервале. Ликвидировать межсимвольную интерференцию можно

путем синтеза сигналов специального типа, чему посвящены работы [5–7].

Данные вопросы объединяет общая проблема повышения скорости и помехоустойчивости выбранных сигналов и методы их синтеза и анализа. Долгие годы в теории связи использовался базис ортогональных тригонометрических функций, затем был предложен базис Котельникова — Шеннона, или функция отсчетов Котельникова вида $\text{sinc}(x) = \sin(x) / x$. С 2009 года появляются работы [7–11], в которых исследуются конечномерные базисы типа Вейля — Гейзенберга.

В то же время все современные разработки, использующие такие виды модуляции, как ортогональная частотная модуляция OFDM, многоуровневая квадратурная модуляция QAM и т. д. опираются на более ранние исследования [12–16]. Поэтому неудивительно, что появились мысли о конечномерных базисах, то есть базисах функций на ограниченном интервале времени, но спектр которых так же ограничен, как и у функции отсчетов Котельникова. Хорошо известно, что функция отсчетов представлена на бесконечном временном интервале, и ограничение ряда Котельникова некоторым числом членов на заданном интервале времени приводит к ошибкам восстановления сигнала. Отсюда часто делался вывод, что полное восстановление сигнала с ограниченным спектром за конечное время в принципе невозможно.

В соответствии с теоремой отсчетов Котельникова непрерывная функция $S(t)$ со спектром, ограниченным сверху частотой f , может быть полностью восстановлена по своим равномерным отсчетам, выполненным с интервалом $\tau = 1 / 2f$:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{n-1} A_k \gamma(f, t, k) = \sum_{k=0}^{n-1} A_k \text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right], \quad (1)$$

где A — вектор отсчетов (амплитуд);

$\gamma(f, t, k)$ — базисная функция;

f — верхняя граничная частота в спектре функции $S(t)$;

k — индекс текущего отсчета;

n — размерность вектора отсчетов.

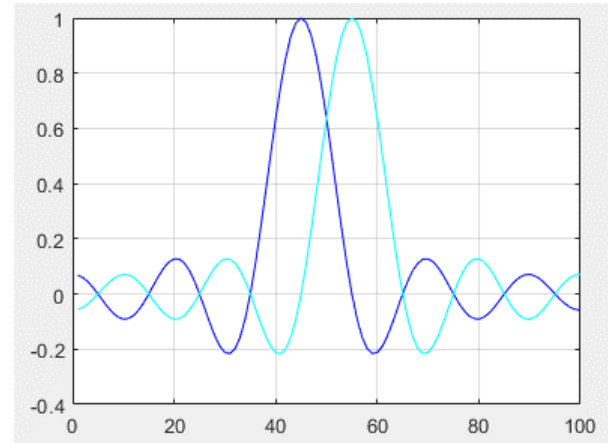


Рис. 1. Функция $\text{sinc}(x)$
при $f = 1600$ Гц, $T = 5/f$, $k_1 = 4,5$ и $k_2 = 5,5$

На рис. 1 представлен график двух функций отсчетов вида $\text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right]$.

Функция (1) решает задачу аппроксимации узловых точек вектора A непрерывным функционалом, состоящим из суммы финитных функций вида $\sin(x)/x$, смещенных для каждого значения вектора A на произведение индекса этого вектора на постоянный интервал, равный половине периода наивысшей частоты в спектре формируемой непрерывной функции. Таким образом, формируемая функция имеет ограниченный спектр и точно проходит через каждое текущее значение этого вектора. Спектр формируемой непрерывной функции $S(t)$ соответствует спектру базисной функции. На рис. 2 представлена аппроксимация вектора, сформированного из 13-позиционного кода Баркера, в котором нули заменены на значения «–1».

Поставим задачу восстановления вектора отсчетов A по значениям непрерывной функции $S(t)$, для этого необходимо осуществить свертку сигнала $S(t)$ с импульсной характеристикой идеального фильтра низких частот (ФНЧ) вида

$$\text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right].$$

$$A_k = 2f \int_0^T S(t) \text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt. \quad (2)$$

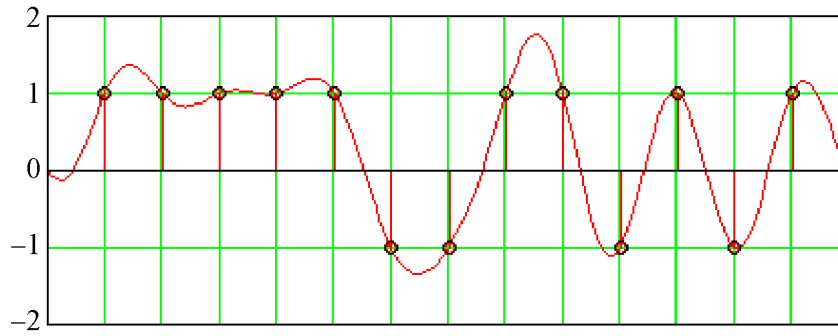


Рис. 2. Вектор A и непрерывная функция, аппроксимирующая значения этого вектора

Подставим в (2) выражение $S(t)$ из (1), тогда получим:

$$Av_k = 2f \int_{-T}^T \sum_{j=0}^{n-1} A_j \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{j}{2f} \right) \right] \times \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt. \quad (3)$$

В выражении (3) индекс j соответствует индексу информационного вектора A , индекс k — смещению импульсной характеристики идеального фильтра низких частот при фильтрации принятого непрерывного сигнала с целью поиска амплитуд принятого вектора Av .

В соответствии с правилами порядок интегрирования и суммирования можно изменить, тогда получим:

$$Av_k = \sum_{j=0}^{n-1} A_j 2f \int_{-T}^T \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{j}{2f} \right) \right] \times \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt. \quad (4)$$

В выражении (4) интеграл представляет собой корреляционную матрицу, в которой при условии ортогональности данного базиса все элементы должны быть равны нулю, кроме тех случаев, когда индексы j и k равны. Но дело в том, что базис Котельникова ортогонален только на бесконечном интервале времени, а в практических случаях он сильно ограничен, в результате ортогональность на малом интервале нарушается в связи с сильно ограниченным числом элементов ряда Котельни-

кова. Проверим, как влияет это ограничение числа элементов ряда Котельникова на точность восстановления переданного вектора.

Пусть на интервале времени $T = (m + 1)/(2f)$ нам необходимо передать независимо $m = 10$ информационных точек. Примем для определенности верхнюю граничную частоту в спектре сигнала равной $f_v = 3000$ Гц. На рис. 3 приведены все 10 базисных функций для данного примера.

Из анализа рис. 3 можно заметить, что первая и последняя базисные функции не могут точно описать принятый сигнал, поскольку их первые боковые всплески не имеют симметричного описания относительно центрального максимума, поэтому их, возможно, следует исключить из базиса.

Обозначим ковариационную матрицу для указанных условий

$$M_{i,k} = 2f \int_{-T}^T \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{j}{2f} \right) \right] \times \operatorname{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt$$

и вычислим ее, оформив в виде табл. 1.

Анализируя данную матрицу, можно заметить, что она далека от ортогональности: на главной диагонали не стоят единицы, то есть отсчеты переданного вектора восстановлены с ошибками. Кроме того, первое и последнее число на главной диагонали сильно отличаются от единицы, поэтому первую и последнюю базисные функции необходимо исключить из базиса. В этом случае точно восстановить можно будет не все 10 отсчетов информационного вектора, а только 8, что и показано на рис. 4.

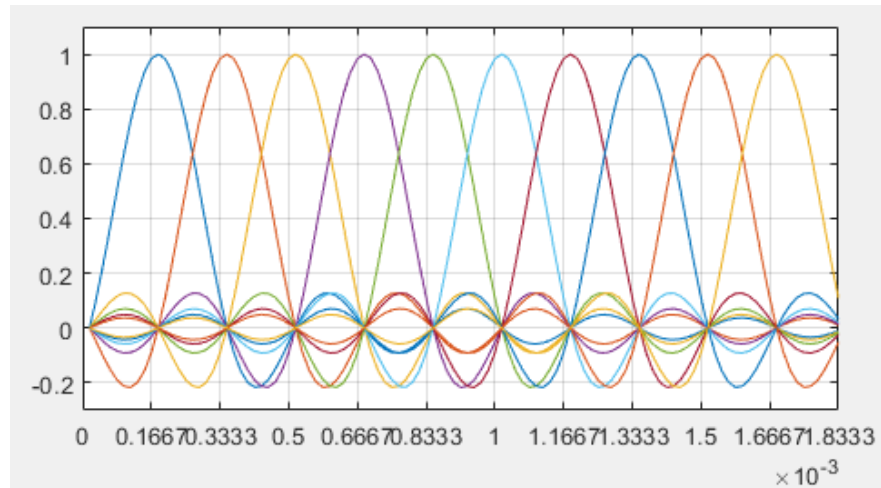


Рис. 3. Базисные функции

Таблица 1

Ковариационная матрица 10 отсчетов информационного вектора

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,9657	0,0404	-0,0336	0,0297	-0,0271	0,0255	-0,0245	0,0241	-0,0244	0,0262
2	0,0404	0,9891	0,0269	-0,0243	0,0227	-0,0217	0,0213	-0,0213	0,0221	-0,0244
3	-0,0336	0,0269	0,9968	0,0217	-0,0206	-0,0200	-0,0199	0,0202	-0,0213	0,0241
4	0,0297	-0,0243	0,0217	1,0001	0,0195	-0,0191	0,0192	-0,0199	0,0213	-0,0245
5	-0,0271	0,0227	-0,0206	0,0195	1,0015	0,0188	-0,0191	0,0200	-0,0217	0,0255
6	0,0255	-0,0217	0,0200	-0,0191	0,0188	1,0015	0,0195	-0,0206	0,0227	-0,0271
7	-0,0245	0,0213	-0,0199	0,0192	-0,0191	0,0195	1,0001	0,0217	-0,0243	0,0297
8	0,0241	-0,0213	0,0202	-0,0199	0,0200	-0,0206	0,0217	0,9968	0,0269	-0,0336
9	-0,0244	0,0221	-0,0213	0,0213	-0,0217	0,0227	-0,0243	0,0269	0,9891	0,0404

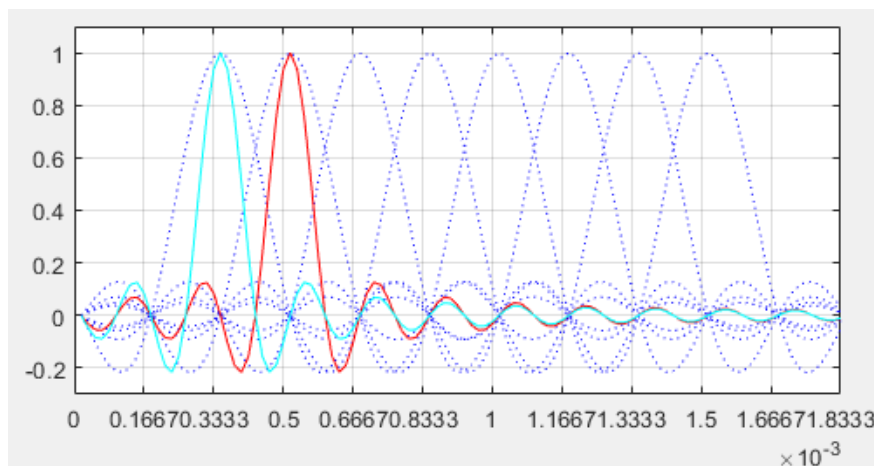


Рис. 4. 8 базисных функций (пунктирные линии), которые могут достаточно точно воспроизвести переданный вектор

После исключения первой и последней точек получим ковариационную матрицу в виде табл. 2.

Анализируя табл. 2, можно заметить, что точность восстановления сигнала заметно повысилась: значения на главной диагонали приблизились

к единице, а остальные значения заметно уменьшились, но поскольку матрица не единичная, то ортогональность базиса не обеспечивается.

На рис. 4 также приведены базисные функции с удвоенной верхней граничной частотой (голубая

Ковариационная матрица 8 отсчетов информационного вектора

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,9693	0,0263	-0,0238	0,0222	-0,0213	0,0208	-0,0209	0,0217
2	0,0263	0,9796	0,0213	-0,0202	0,0196	-0,0195	0,0198	-0,0209
3	-0,0238	0,0213	0,9801	0,0191	-0,0188	0,0189	-0,0195	0,0208
4	0,0222	-0,0202	0,0191	0,9815	0,0184	-0,0188	0,0196	-0,0213
5	-0,0213	0,0196	-0,0188	0,0184	0,9815	0,0191	-0,0202	0,0222
6	0,0208	-0,0195	0,0189	-0,0188	0,0191	0,9801	0,0213	-0,0238
7	-0,0209	0,0198	-0,0195	0,0196	-0,0202	0,0213	0,9769	0,0263
8	0,0217	-0,0209	0,0208	-0,0213	0,0222	-0,0238	0,0263	0,9693

и красная линии). Первая и вторая базисные функции (пунктирные линии) пересекаются в момент времени, соответствующий точке пересечения голубой и красной базисных функций (которые в этот момент времени принимают значение, равное нулю, и которые используются в качестве импульсных характеристик идеального ФНЧ при приеме сигнала). В этот момент времени первая и вторая базисные функции принимают значение 0,64, что в сумме даст значение 1,28. Если обе эти базисные функции будут передавать информацию о том, что первая и вторая информационные точки входного вектора равны 1, то значение между ними, равное 1,28, будет не сильно изменять спектр синтезируемого сигнала, то есть первая и вторая базисные функции, имея каждая верхнюю граничную частоту спектра равной f_v , обеспечивают верхнюю граничную частоту их суммы также равной f_v . Поэтому спектр синтезируемого сигнала в процессе выполнения операции (1) остается ограниченным частотой f_v .

Вместе с тем на приемной стороне в процессе восстановления переданного вектора применение в формуле (4) в качестве импульсной характеристики идеального фильтра низких частот функции отсчетов, использованной в формуле (1), приводит к неточному восстановлению переданного вектора за счет того, что отсчеты, формируемые базисными функциями (1), являются коррелированными в точке пересечения этих базисных функций, что и приводит к результату, отображенному в ковариационной матрице (табл. 1).

Если же при восстановлении сигнала на приемной стороне в качестве импульсной характеристи-

ки идеального фильтра низких частот в формуле (4) использовать базисные функции с удвоенной верхней граничной частотой, то ошибок восстановления можно избежать. В этом случае формула (4) преобразуется к виду:

$$Av_k = \sum_{j=0}^{n-1} A_j 4f \int_{-T}^T \text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{j}{2f} \right) \right] \times \times \text{sinc} \left[4\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt, \quad (5)$$

а ковариационная матрица примет вид:

$$M_{i,k} = 4f \int_{-T}^T \text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{j}{2f} \right) \right] \times \times \text{sinc} \left[4\pi f \left(t - \frac{k}{2f} \right) \right] dt.$$

Расчеты этой ковариационной матрицы дают значения, приведенные в табл. 3.

Анализируя табл. 3 и сравнивая ее значения с табл. 2, можно заметить, что точность восстановления значительно повысилась, но полной ортогональности нет, поскольку ковариационная матрица не является единичной.

Основной причиной данных результатов является то, что выбранный базис в виде функции $\text{sinc}(x)$ не является ортогональным на малом интервале времени. Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти такой базис, который будет ортогональным на заданном, достаточно малом, интервале времени, и при этом спектр базисных функций должен располагаться не выше частоты f_v .

Таблица 3

**Ковариационная матрица 8 отсчетов информационного вектора
с удвоенной верхней граничной частотой**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,9991	5,1259e-04	-3,4597e-04	2,5192e-04	-1,8894e-04	1,3839e-04	-8,5432e-05	3,4868e-17
2	-5,1259e-04	1,0003	-1,7935e-04	1,2159e-04	-8,1057e-05	4,4837e-05	5,5511e-17	-8,5432e-05
3	-3,4597e-04	1,7935e-04	0,9999	6,3821e-05	-3,1911e-05	1,6653e-17	4,4837e-05	-1,3839e-04
4	-2,5192e-04	1,2159e-04	-6,3821e-05	1,0000	9,9920e-17	-3,1911e-05	8,1057e-05	-1,8894e-04
5	-1,8894e-04	8,1057e-05	-3,1911e-05	2,2204e-17	1,0000	-6,3821e-05	1,2159e-04	-2,5192e-04
6	-1,3839e-04	4,4837e-05	8,0491e-17	-3,1911e-05	6,3821e-04	0,9999	1,7935e-04	-3,4597e-04
7	-8,5432e-05	8,8124e-17	4,4837e-05	-8,1057e-05	1,2159e-04	1,7935e-04	1,0003	-5,1259e-04
8	3,5388e-17	-8,5432e-05	1,3839e-04	-1,8894e-04	2,5192e-04	-3,4597e-04	5,1259e-04	0,9991

Постановка задачи

Предполагается, что информация в канал связи будет передаваться сигнальными конструкциями, заданными на некотором интервале, причем конструкции, расположенные в смежных интервалах, не должны оказывать взаимного влияния, а элементы, используемые внутри интервалов, должны быть строго ортогональными.

Необходимо найти такую базисную функцию, которая в области центрального пика будет вести себя аналогично функции $\text{sinc}(x)$, иметь ограниченный спектр, но при этом на краях выбранного интервала времени T она должна быть тождественно равной нулю. Возможным решением данной задачи может являться поэлементное произведение функции $\text{sinc}(x)$, пик которой сдвинут на середину временного интервала T и косинуса, половина периода которого равна интервалу T , и который сдвинут по фазе на половину длительности интервала T . Тогда функция примет вид:

$$\gamma(f, t, k) = \text{sinc}\left[2\pi f\left(t - \frac{T}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{T}\left(t - \frac{T}{2}\right)\right]. \quad (6)$$

На рис. 5 точками показана функция $\text{sinc}(x)$, а сплошной линией — функция (6).

Для дальнейшего использования предлагаемой функции необходимо перейти к дискретным отсчетам. Зададимся частотой дискретизации, равной 60 000 Гц, что в 20 раз превышает верхнюю граничную частоту выбранного диапазона $f_v = 3000$ Гц. В указанном случае общее число дискретных точек составит $n = 110$.

$$\gamma(i, Fd, t, k) = \text{sinc}\left[2\pi f\left(\frac{i}{Fd} - \frac{T}{2}\right)\right] \times \cos\left[\frac{\pi}{T}\left(\frac{i}{Fd} - \frac{T}{2}\right)\right], \quad (7)$$

Теперь первая базисная функция с нулевым сдвигом может быть получена путем циклического сдвига функции (7) на половину периода T . На рис. 6 приведен результат циклического сдвига.

На рис. 7 пунктиром приведены 8 базисных функций, полученных в результате циклического сдвига функции (7), и первые базисные функции, используемые для восстановления информационного вектора.

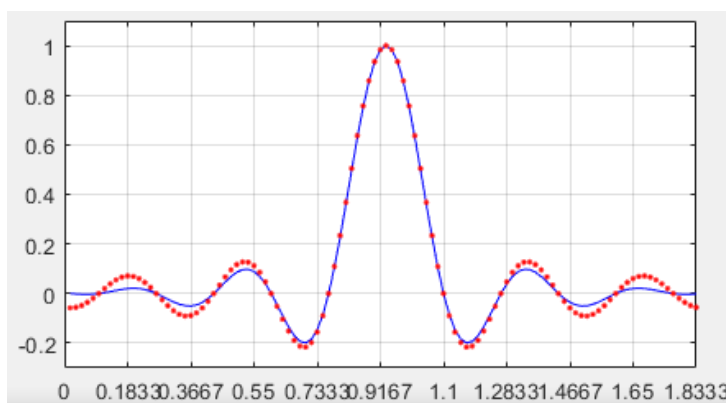


Рис. 5. Модифицированная функция отсчетов и функция $\text{sinc}(x)$

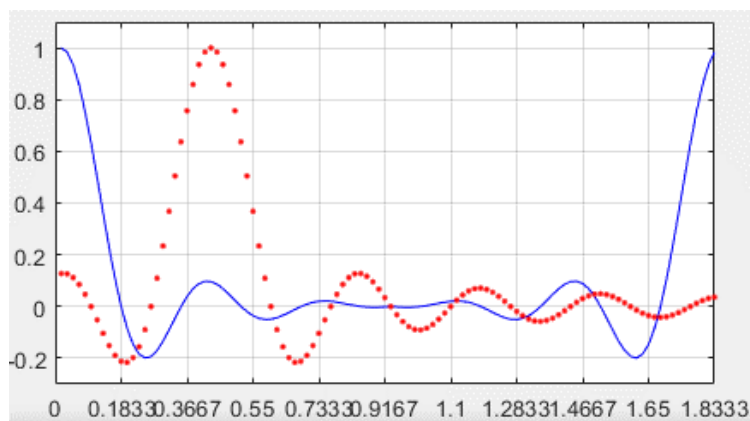


Рис. 6. Синтезированная периодическая базисная функция (сплошная линия) и функция $\text{sinc}(x)$

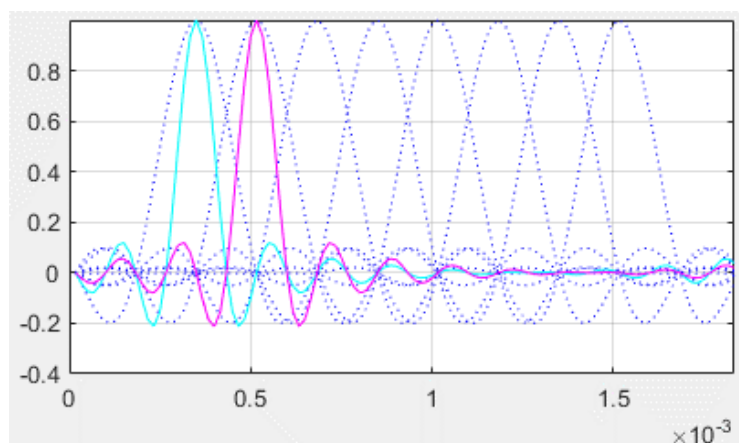


Рис. 7. Семейство аппроксимирующих базисных функций и базисные функции для восстановления информационного вектора

Таблица 4

Ковариационная матрица итоговых базисных матриц

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05	4,4751e-05	1,5276e-04	4,3793e-04	4,3793e-04	1,5276e-04
2	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05	4,4751e-05	1,5276e-04	4,3793e-04	4,3793e-04
3	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05	4,4751e-05	1,5276e-04	4,3793e-04
4	4,4751e-05	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05	4,4751e-05	1,5276e-04
5	1,5276e-04	4,4751e-05	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05	4,4751e-05
6	4,3793e-04	1,5276e-04	4,4751e-05	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05	4,4870e-05
7	4,3793e-04	4,3793e-04	1,5276e-04	4,4751e-05	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000	2,1980e-05
8	1,5276e-04	4,3793e-04	4,3793e-04	1,5276e-04	4,4751e-05	4,4870e-05	2,1980e-05	1,0000

В табл. 4 приведена ковариационная матрица базисов синтеза и анализа сигнала, обладающего ограниченным спектром на заданном интервале времени. С вычислительной точки зрения эту матрицу уже можно считать единичной: на главной диагонали стоят единицы, а все остальные элементы близки к нулю, причем элементы главной диагонали с высокой точностью равны единице.

Построение сигналов на основе предложенного базиса

На рис. 8 приведен текст программы для среды MATLAB, которая демонстрирует процессы генерации ортогонального базиса и использования его для синтеза сигнала в заданном компакте по времени и занимаемой полосе частот. Текст программы дополнен нумерацией строк для пояснения производимых действий.

```

SiTanProv_1.m
1  A=[1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1];
2  m=15; f=3000; Fd= 20*f; T=(m+1)/(2*f); n=round(T*Fd); dd=Fd/(2*f);
3  B=sinc(2*f.*((1:n)-1)/Fd-T/2)).*cos((pi/T).*((1:n)-1)/Fd-T/2));
4  B2=sinc(4*f.*((1:n)-1)/Fd-T/2)).*cos((pi/T).*((1:n)-1)/Fd-T/2));
5  Baz0=circshift(B,n/2); Baz2=circshift(B2,n/2);
6  for k=1:m-2; Ba(k,:)=circshift(Baz0,(k+1).*dd); end
7  for k=1:m-2; Ba2(k,:)=circshift(Baz2,(k+1).*dd); end
8  W=(Ba*Ba').*(2*f/Fd); W2=(Ba2*Ba').*(4*f/Fd);
9  Sp(1:m-2,:)=fft(Ba(1:m-2,:));
10 Sig=A*Ba; Av=Ba2*Sig'.*(4*f/Fd); SpS=fft(Sig);
11 subplot(131)
12 plot(((1:n)-1)/Fd,Sig,'b',((1:m-2)+1)/(2*f),A(1:m-2),'+k'); hold on
13 plot(((1:m-2)+1)/(2*f),Av(1:m-2),'or'); grid on; xlim([0 T]); hold off
14 subplot(132)
15 plot(real(SpS(1,1:n)),imag(SpS(1,1:n)),'*b');
16 grid on; ylim([-50 50]); axis equal;
17 subplot(133)
18 plot((1:n)/(T*1000),real(SpS(1,1:n)),'*b'); hold on
19 plot((1:n)/(T*1000),imag(SpS(1,1:n)),'or'); hold off
20 grid on; xlim([0 4]); ylim([-40 40]); xticks(1:0.5:4)

```

Рис. 8. Программа математического моделирования ортогонального базиса и процессов синтеза и анализа сигналов для узкополосного канала связи

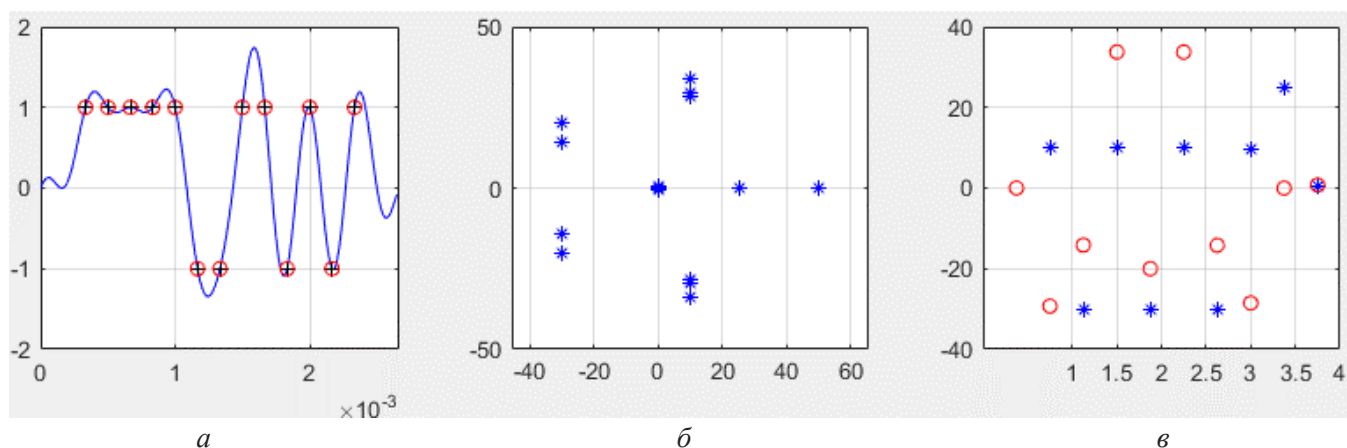


Рис. 9. Основные результаты расчета: а — сформированный сигнал, информационный вектор A и восстановленный вектор Av ; б — комплексные спектральные числа вектора Sig на фазовой плоскости; в — действительные и мнимые компоненты энергетического спектра сигнала

Идентификаторы основных расчетных векторов и матриц:

- A — входной информационный вектор-строка, представленный 13-позиционным кодом Баркера (рис. 2), в котором значение «0» заменено на «-1»;
- B — порождающий вектор для формирования базиса синтеза Ba (модуляция);
- $B2$ — порождающий вектор для формирования базиса анализа $B2$ (демодуляция);
- W — корреляционная матрица базиса синтеза;
- $W2$ — ковариационная матрица матриц синтеза и анализа;
- Sig — вектор-строка сформированного сигнала для передачи в канал;

– Av — восстановленный информационный вектор.

В строке 10 приведены основные матричные операции синтеза сигнала Sig и восстановления информационного вектора Av .

В строках 11–20 приведены процедуры вывода результатов расчета. Вариант таких результатов представлен на рис. 9. На рис. 9, а приведен синтезированный сигнал (сплошная линия), знаком «+» отображен переданный вектор, знаком «o» — принятый вектор. На рис. 9, б показан фазовый спектр синтезированного сигнала, а на рис. 9, в — комплексные числа энергетического спектра на оси частот в кГц.

Заключение

1. Моделирование процессов передачи различных сигналов в заданной полосе с использованием описанных базисов привело авторов к утверждению, что при отсутствии шума полностью и безошибочно восстановить финитный сигнал в ограниченный промежуток времени все-таки можно. Но это возможно только в том случае, если ортогональный базис построен именно для этого интервала времени и если количество передаваемых информационных отсчетов соответствует числу ортогональных функций, синтезированных для этого интервала времени.

2. Основные неудачи многих исследователей в восстановлении сигнала с ограниченным спектром при использовании функции отсчетов состояли в том, что они использовали в качестве импульсной характеристики идеального фильтра низких частот ту же функцию отсчетов, с помощью которой

синтезировался сигнал (1). Вместе с тем для существенного повышения точности восстановления сигнала, синтезированного по формуле (1), необходимо использовать базисную функцию с удвоенной верхней частотой (5).

3. Для полного восстановления финитной функции за ограниченное время при отсутствии шумов необходимо использовать и для синтеза, и для анализа базисные функции, специально синтезированные для заданного временного интервала, при этом общее число независимо передаваемых отсчетов должно соответствовать, но не превышать общего числа ортогональных базисных функций, синтезированных для этого временного интервала.

4. В данном исследовании не рассмотрен очень важный вопрос о возможных методах синхронизации шкал времени при синтезе и анализе сигнала в процессах его передачи и приема. Этот вопрос требует изложения в отдельной статье.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров В. В., Ходаковский В. А. Синтез ЛЧМ сигнала в полосе ТЧ с улучшенными свойствами по АКФ и пик-фактору // Современные технологии обработки сигналов (СТОС-2023): Доклады 4-ой Всероссийской конференции (Москва, Россия, 12–13 декабря 2023 г.). М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова, 2023. С. 54–59.
2. Егоров В. В., Лобов С. А., Ходаковский В. А. Синтез последовательностей с идеальными автокорреляционными свойствами // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 11. С. 78–89. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-78-89.
3. Булавский П. Е., Василенко М. Н., Ходаковский В. А. Интеллектуальное цифровое управление тональными рельсовыми цепями // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 3. С. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2022.3.3.001.
4. Гришенцев А. Ю. Метод синтеза алфавитов ортогональных сигнальных широкополосных сообщений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 6. С. 1074–1083. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1074-1083.
5. Синтез сигналов с оптимальными по уровню боковых лепестков автокорреляционными свойствами / В. А. Ходаковский, В. Г. Дегтярев, П. В. Герасименко, С. В. Микони // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15, Вып. 4. С. 629–636. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-4-629-636.
6. Ходаковский В. А., Дегтярев В. Г. О теореме отсчетов и ее применении для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14, Вып. 3. С. 562–573.
7. Chonavel T. Orthogonal Signals with Jointly Balanced Spectra: Application to CDMA Transmissions // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2011. Art. No. 176. 19 p. DOI: 10.1186/1687-1499-2011-176.
8. Петров Д. А. Синтез хорошо-локализованных конечномерных базисов Вейля-Гейзенберга и их применение для построения высокоэффективных алгоритмов обработки сигналов: автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Петров Дмитрий Андреевич; [Место защиты: Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова]. М., 2010. 18 с.
9. Волчков В. П., Петров Д. А. Оптимизация ортогонального базиса Вейля-Гейзенберга для цифровых систем связи, использующих принцип OFDM/OQAM передачи // Научные ведомости Белгородского государственного университета. История. Политология. Экономика. Информатика. 2009. № 1 (56), Вып. 9/1. С. 104–112.

10. Volchkov V. P., Petrov D. A. Orthogonal Well-Localized Weyl-Heisenberg Basis Construction and Optimization for Multicarrier Digital Communication Systems // Proceedings of the 2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops (ICUMT 2009), (Saint Petersburg, Russia, 12–14 October 2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 4 p. DOI: 10.1109/ICUMT.2009.5345586.

11. Волчков В. П. Сигнальные базисы с хорошей частотно-временной локализацией // Электросвязь. 2007. № 2. С. 21–25.

12. Прокис Дж. Цифровая связь = Digital Communications / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

13. Mallat S. G. A Wavelet Tour of Signal Processing: Second Edition. San Diego (CA): Academic Press, 1999. 661 p.

14. Haas R., Belfiore J.-C. A Time-Frequency Well-localized Pulse for Multiple Carrier Transmission // Wireless Personal Communications. 1997. Vol. 5, Iss. 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1023/A:1008859809455.

15. Muschallik C. Improving an OFDM Reception Using an Adaptive Nyquist Windowing // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1996. Vol. 42, Iss. 3. Pp. 259–269. DOI: 10.1109/30.536046.

16. Петухов А. П. Периодические дискретные всплески // Алгебра и анализ. 1996. Т. 8, Вып. 3. С. 151–183.

Дата поступления: 21.02.2025

Решение о публикации: 07.03.2025

Orthogonal Basis Synthesis at a Finite Time Interval for Digital Signal Processing with Limited Spectrum

Valentin A. Khodakovsky — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department of Computer Science and Information Security. Research interests: mathematical modelling, digital signal processing, information theory. E-mail: hval104@mail.ru

Vladislav D. Korotchenko — Postgraduate Student of the Department of Electrical Communications. Research interests: mathematical modeling, digital signal processing, information theory. E-mail: vladis147@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Khodakovsky V. A., Korotchenko V. D. Orthogonal Basis Synthesis at a Finite Time Interval for Digital Signal Processing with Limited Spectrum. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 71–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-71-82. (In Russian)

Abstract. *The problem of synthesizing an orthogonal basis for transmitting information over narrow-band communication channels in the presence of noise is considered. **Purpose:** to develop an orthogonal-basis finite-time synthesis method for efficient digital processing of limited-spectrum signals, with the aim of increasing the capacity of digital communication channels. To achieve this goal, the matrix method of signal synthesis and analysis, the MATLAB environment and other innovative approaches were used. **Methods:** theoretical analysis and computer modelling. **Results:** the high potential of using the finite-time orthogonal basis for synthesizing and analyzing limited-spectrum signals has been confirmed. **Practical significance:** improved quality of signal transmission, especially in conditions of limited bandwidth of communication channels contributing to the creation of more efficient and reliable communication systems. **Discussion:** makes recommendations for further improvement of the proposed basis and highlights issues requiring further research and development. This study is important for the development of railway telecommunication technologies in rail transport.*

Keywords: function basis decomposition, orthogonal basis, approximation, synthesis and analysis of signals, digital signal processing

REFERENCES

1. Egorov V. V., Khodakovskiy V. A. Sintez LChM signala v polose TCh s uluchshennymi svoystvami po AKF i pik-faktoru [Synthesis of a LFM Signal in the TF Band with Improved Properties by ACF and Peak Factor], *Sovremennye tekhnologii obrabotki signalov (STOS-2023): Doklady 4-oy Vserossiyskoy konferentsii [Modern Technologies of Signal Processing (MTSP-2023): Proceeding of the Fourth All-Russian Conference]*, Moscow, Russia, December 12–13, 2023. Moscow, A. S. Popov Russian Science and Technical Society, 2023. Pp. 54–59. (In Russian)
2. Egorov V. V., Lobov S. A., Khodakovskiy V. A. Sintez posledovatelnostey s idealnymi avtokorrelyatsionnymi svoystvami [Synthesis of Sequences with ideal Autocorrelation Properties], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2022, Vol. 8, No. 11, Pp. 78–89. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-78-89. (In Russian)
3. Bulavsky P. E., Vasilenko M. N., Khodakovskiy V. A. Intellekturnoe tsifrovoye upravlenie tonalnymi relsovmymi tsepyami [Intelligent Digital Control Tonal Rail Chains], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2022, No. 3, Pp. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2022.3.3.001. (In Russian)
4. Grishentsev A. Yu. Synthesis Method for Alphabets of Orthogonal Signaling Broadband Communications, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, Vol. 18, No. 6, Pp. 1074–1083. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1074-1083. (In Russian)
5. Khodakovskiy V. A., Degtyarev V. G., Gerasimenko P. V., Mikoni S. V. Sintez signalov s optimalnymi po urovnyu bokovykh lepestkov avtokorrelyatsionnymi svoystvami [Design of Signals with Autocorrelated Qualities That Have Optimised Side-Lobe Level], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2018, Vol. 15, Iss. 4, Pp. 629–636. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-4-629-636. (In Russian)
6. Khodakovskiy V. A., Degtyarev V. G. O teoreme otschetov i ee primenenii dlya sinteza i analiza signalov s ogranichenym spektrom [On Sampling Theorem and Its Application for the Purposes of Synthesis and Analysis of Band-Limited Signals], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2017, Vol. 14, Iss. 3, Pp. 562–573. (In Russian)
7. Chonavel T. Orthogonal Signals with Jointly Balanced Spectra: Application to CDMA Transmissions, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, Art. No. 176, 19 p. DOI: 10.1186/1687-1499-2011-176.
8. Petrov D. A. Sintez khorosho-lokalizovannykh konechnomernykh bazisov Veylya-Geyzenberga i ikh primenenie dlya postroyeniya vysokoeffektivnykh algoritmov obrabotki signalov [Synthesis of well-localized finite-dimensional Weyl-Heisenberg bases and their application to constructing highly efficient signal processing algorithms]: Abstract of the diss. on competition of a scientific degree PhD (Physics and Math.). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2010, 18 p. (In Russian)
9. Volchkov V. P., Petrov D. A. Optimizatsiya ortogonalnogo bazisa Veylya-Geyzenberga dlya tsifrovyykh sistem svyazi, ispolzuyushchikh printsip OFDM/OQAM peredachi [Orthogonal Weyl-Heisenberg Basis Optimisation for Digital Communication Systems Based on OFDM/OQAM], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika [Belgorod State University Scientific Bulletin. History. Political Science. Economics. Information Technologies]*, 2009, No. 1 (56), Iss. 9/1, Pp. 104–112. (In Russian)
10. Volchkov V. P., Petrov D. A. Orthogonal Well-Localized Weyl-Heisenberg Basis Construction and Optimization for Multicarrier Digital Communication Systems, *Proceedings of the 2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops (ICUMT 2009)*, Saint Petersburg, Russia, October 12–14, 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 4 p. DOI: 10.1109/ICUMT.2009.5345586.
11. Volchkov V. P. Signalnye bazisy s khoroshey chastotno-vremennoy lokalizatsiey [Signal bases with good time-frequency localization], *Electrosvyaz Magazine*, 2007, No. 2, Pp. 21–25. (In Russian)
12. Proakis J. G. Tsifrovaya svyaz [Digital Communications]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 2000, 800 p. (In Russian)

13. Mallat S. G. A Wavelet Tour of Signal Processing: Second Edition. San Diego (CA), Academic Press, 1999, 661 p.
14. Haas R., Belfiore J.-C. A Time-Frequency Well-localized Pulse for Multiple Carrier Transmission, *Wireless Personal Communications*, 1997, Vol. 5, Iss. 1, Pp. 1–18. DOI: 10.1023/A:1008859809455.
15. Muschallik C. Improving an OFDM Reception Using an Adaptive Nyquist Windowing, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1996, Vol. 42, Iss. 3, Pp. 259–269. DOI: 10.1109/30.536046.
16. Petukhov A. P. Periodicheskie diskretnye vspleski [Periodic Discrete Wavelets], *Algebra i Analiz*, 1996, Vol. 8, Iss. 3, Pp. 151–183. (In Russian)

Received: 21.02.2025

Accepted: 07.03.2025

УДК 656.073

Выбор теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах сетей 5G

- Дворников Сергей Викторович¹** — д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, заслуженный изобретатель Российской Федерации. Научные интересы: теория связи, помехозащищенность инфокоммуникационных каналов радиотехнических систем, методы совместной частотно-временной обработки сигналов. E-mail: practicsv@yandex.ru
- Казакевич Елена Владимировна²** — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая связь». Научные интересы: системы электросвязи, системы и средства электропитания устройств электросвязи. E-mail: kev-pgups@yandex.ru
- Маслова Анна Андреевна²** — аспирант по специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Научные интересы: разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций. E-mail: bloodyelis@yandex.ru
- Ролдугина Елена Ивановна³** — научный сотрудник 31-го отдела 3-го научно-исследовательского управления Научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий ВМВ и разведки. Научные интересы: цифровая обработка сигналов и систем широкополосного доступа. E-mail: zlatoustova88@mail.ru
- Арнадская Юлия Евгеньевна²** — студент 5-го курса направления 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов». Научные интересы: радиотехнические системы на железнодорожном транспорте, применение интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте. E-mail: arnadskayaa@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова», Россия, 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1

Для цитирования: Дворников С. В., Казакевич Е. В., Маслова А. А., Ролдугина Е. И., Арнадская Ю. Е. Выбор теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах сетей 5G // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 83–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-83-92

Аннотация. Актуальность предлагаемого исследования определяется тем, что в условиях развития цифровых систем дистанционного управления элементами инфраструктуры железнодорожного транспорта, включающих применение технологии 5G, возрастает необходимость в анализе канала приема-передачи и принципа работы энергетического обнаружителя. Представлено исследование о выборе теста для проверки вида распределения входной реализации в каналах 5G. **Цель:** снижение коллизии в каналах связи, возникающих из-за ошибочного анализа входной реализации. **Методы:** теоретический и эмпирико-аналитический анализ эффективности методов обнаружения сигналов в условиях прерывистых передач. **Результаты:** проведен эксперимент по моделированию случайных выборок при отношении сигнал/шум не менее 10 дБ в канале. Полученная в результате моделирования вероятность правильного принятия решения о прерывистости канала не ниже 0,7 подтвердила правомерность выбора теста Харке — Бера для анализа каналов с прерывистой передачей. **Заключение и новизна:**

авторским вкладом в рассматриваемую проблему является разработка идеи, согласно которой необходимо проведение предварительного анализа входной реализации и учета показателей распределения, таких как асимметрия и эксцесс. В дальнейшем это станет основой для построения адаптивного энергетического обнаружителя, работающего исходя из вида распределения обрабатываемой реализации.

Практическая значимость: заключается в том, что результаты могут быть использованы для повышения надежности и точности работы энергетических обнаружителей в беспроводных системах связи, особенно в условиях ограниченного объема статистических данных и изменяющегося состояния канала. Учет априорной информации о распределении сигнала позволяет оптимизировать процесс настройки обнаружителя, сократить время срабатывания.

Ключевые слова: технология NR-U, энергетический обнаружитель, тест Харке — Бера, широкополосный доступ, канал с прерывистой передачей

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

В настоящее время диапазоны частот 2,4 ГГц и 5,725 ГГц, изначально выделенные для работы промышленного, научного и медицинского оборудования (Industrial, Scientific and Medical, ISM), планируются к активному использованию в контурах дистанционного управления различными устройствами на железнодорожном транспорте [1, 2].

Как правило, работа в диапазоне ISM организуется в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4 и IEEE 802.11. Поскольку указанные диапазоны являются нелицензируемыми, их эксплуатация нередко приводит к возникновению коллизий [3].

Одной из особенностей технологий 5G является организация высокоскоростного широкополосного доступа на основе технологии когнитивного радио [4–6], получившего название NR-U (New Radio Unlicensed). Радиодоступ NR-U базируется на реализации дополнительной процедуры мониторинга диапазона перед непосредственным захватом канала путем случайного доступа (Random Access Channel, RACH).

Учитывая, что доступ NR-U разрабатывается с учетом действующих нормативных документов, то для ISM-диапазонов он соответствует требованиям и предыдущего стандарта LTE (Long Term Evolution) [7, 8]. И решение о занятости канала в нем осуществляется по результатам процедур энерге-

тического обнаружения, предписанных для стандарта LTE [9].

Эффективность энергетических обнаружителей оправдана только в случае априорного знания закона распределения сигнала [10]. А поскольку настройка обнаружителя требует достаточной статистики, то такая процедура предполагает затрату значительного временного ресурса. В таких условиях состояние канала может измениться. Следовательно, знание закона распределения входной реализации является одним из необходимых условий, обеспечивающих эффективность работы энергетического обнаружителя.

Рассмотрению этих вопросов как раз и посвящена настоящая статья.

Особенности работы энергетических обнаружителей в соответствии со стандартом LTE

Поскольку процедура энергетического обнаружителя реализуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотной области, то необходима предварительная настройка порога принятия решения о наличии или отсутствии сигналов в анализируемом рабочем канале [11, 12].

Такая настройка приемлема только для стационарных сигналов, и в условиях мощных импульс-

ных излучений достоверность получаемых результатов будет низкой, так как накопление полезной энергии сигнала на длительном интервале с последующим ее усреднением может привести к ошибочным решениям. Однако именно такой характер работы радиолинии характерен для пакетных передач данных [13, 14].

Алгоритм обнаружения сигналов в режиме прерывистых передач получен в [15], где сделан вывод о том, что для обеспечения необходимой эффективной работы обнаружителя необходим большой объем априорной информации, в частности об интенсивности работы передатчика, данных по расчету средней и текущей длительностей сигнала, периодичности занятости канала, а также значения отношения сигнал/шум (Signal-to-noise ratio, SNR) в различные моменты работы радиолинии. Поскольку только в этом случае возможно обеспечить необходимую эффективность работы обнаружителя. На практике в большинстве случаев используют методы обнаружения, основанные на статистическом анализе распределения плотности сигнальной энергии, получившего название теста добротности (Goodness-of-Fit, GoF) [16–18]. Реализация теста GoF предполагает эмпирический анализ распределений обрабатываемых выборок с последующим соотнесением их к ожидаемому типу распределения.

При этом в большинстве случаев полагают, что сумму двух распределений, описываемых функцией Гаусса, также можно считать гауссовой [19]. Но такое утверждение верно только при полной занятости канала на всей длительности интервала наблюдения, что не соответствует действительности.

Вместе с тем суммарный поток амплитудных компонентов сигнала и шума, распределенных по нормальному закону, сохранит гауссову форму только для непрерывного потока выборок зашумленного сигнала, что не соответствует условиям прерывистых передач, характерных для NR-U.

Предварительный анализ, проведенный в [20, 21], показал, что такие условия изначально исключают эффективное использование тестов GoF, поскольку результирующее распределение не будет гауссовым.

Альтернативным подходом в таких условиях видится применение методов анализа, основанных на учете статистических моментов более высокого порядка (Higher-order statistics, HoS), предложенных в [22].

Модель обнаружителя для NR-U

Работу энергетического обнаружителя представим в виде бинарной модели принятия решений, характеризуемой двумя устойчивыми состояниями [23]:

$$z(t) = \begin{cases} x(t), & \text{при } H_0; \\ s(t) + x(t), & \text{при } H_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $z(t)$ — обрабатываемая входная реализация;

$s(t)$ — полезный сигнал с неизвестными параметрами;

$x(t)$ — аддитивный белый гауссов шум (Additive White Gaussian Noise, AWGN).

В соответствии с бинарной моделью, правило принятия решения $\Lambda(x)$, характеризующее текущее состояние радиоканала, в соответствии с условием (1), будет определяться двумя гипотезами:

- H_0 — обрабатываемая реализация $z(t)$ содержит только шум $x(t)$;
- H_1 — обрабатываемая реализация содержит аддитивную смесь полезного сигнала $s(t)$ и AWGN $x(t)$.

Тогда, определив в качестве энергетического порога величину G_0 , результирующее правило принятия решения $\Lambda(x)$ представим как

$$\begin{cases} H_0 & \text{— } \Lambda(t) < G_0, \\ H_1 & \text{— } \Lambda(t) \geq G_0. \end{cases} \quad (2)$$

Далее будем полагать, что приемник обрабатывает входную реализацию $z(t)$, состоящую из $t = 1 \dots N$ отчетов, взятых с частотой дискретизации $f_s = N/T$ на длительности интервала обнаружения, равного T .

Тогда сигнал пакетной передачи как объект обнаружения представим в виде динамического процесса, принимающего случайным образом моменты своего состояния, определяемые в соответствии со сформулированными гипотезами H_1 и H_0 .

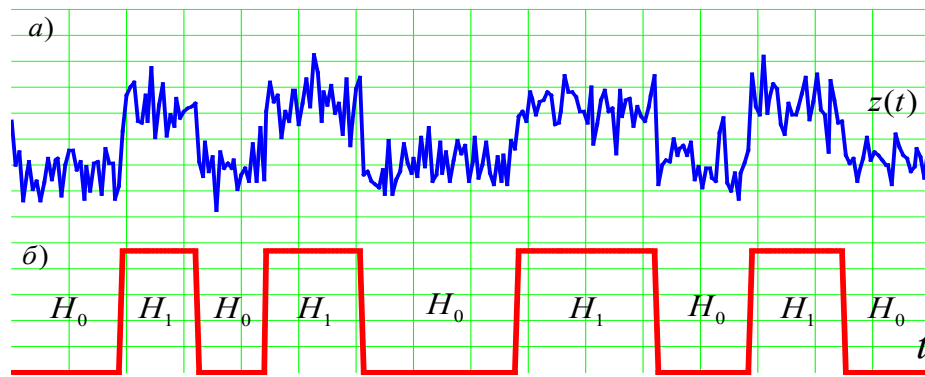


Рис. 1. Обрабатываемая реализация и временные интервалы, соответствующие характеризующим ее гипотезам

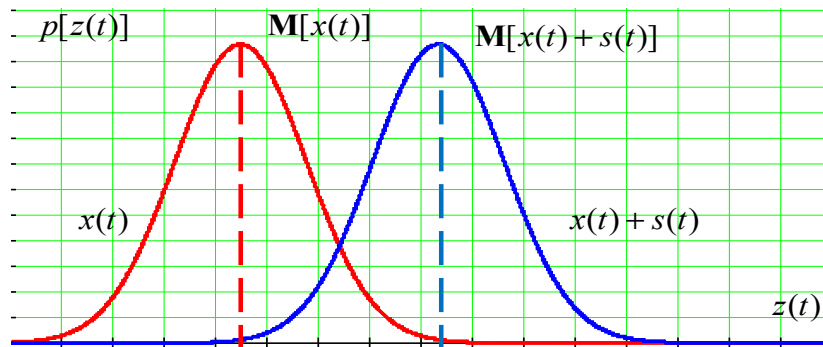


Рис. 2. Распределение входной реализации: шума $x(t)$ и аддитивной смеси полезного сигнала и шума $x(t) + s(t)$ для непрерывной передачи

Если допустить, что характер детерминированного сигнала $s(t)$ пакетной передачи не зависит от интервала обнаружения, то такой процесс может быть описан экспоненциальным распределением со средними значениями параметров τ и η [13].

В качестве примера на рис. 1, а представлена входная реализация $z(t)$, а на рис. 1, б — временные интервалы, характеризующие ее гипотезы.

Согласно выражению (2) и иллюстрациям (рис. 1), эффективность энергетического обнаружителя следует рассматривать с позиций соответствия обрабатываемой реализации на интервале обработки выдвинутой гипотезе.

Обоснование выбора теста для проверки вида распределения входной реализации

В статистическом анализе решение подобной задачи формально может быть сведено к проверке соответствия распределения функции Гаусса.

Для этого разработано достаточно большое количество различных тестов, таких как тесты Шапиро — Уилка, Андерсона — Дарлинга, Колмогорова — Смирнова и др. [24].

В общем случае для непрерывного канала наличие полезного сигнала приведет лишь к смещению распределения по оси абсцисс (рис. 2).

На рис. 2 введены следующие обозначения:

$M[x(t)]$ — математическое ожидание выборки, содержащей только шум;

$M[s(t) + x(t)]$ — математическое ожидание выборки, содержащей полезный сигнал и шум;

$p[z(t)]$ — показатель частоты проявления амплитудных значений входной выборки [25].

В то же время распределение входной реализации прерывистой передачи будет иметь распределение с ярко выраженной седловой точкой (рис. 3).

В подтверждение сделанной гипотезы на рис. 4 показано распределение выборки, изображенной на рис. 1.

Очевидно, что наличие характерного выброса формируемого распределения справа может служить одним из факторов, характеризующих работу канала с прерывистой передачей.

Для рассмотренной ситуации в [26] рекомендован тест Харке — Бера (JB), основанный на учете эксцесса и асимметрии обрабатываемого распределения.

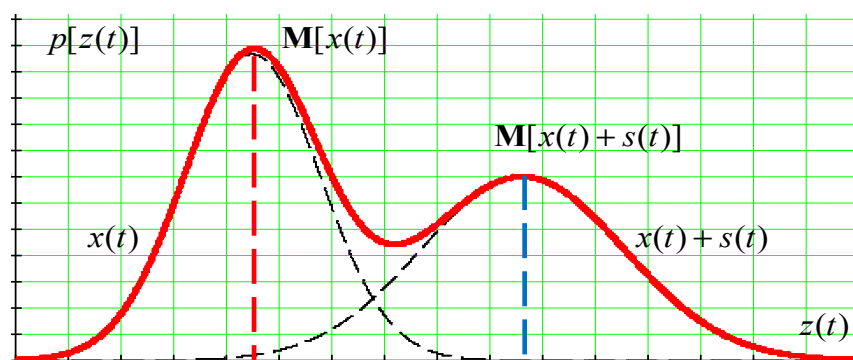


Рис. 3. Распределение входной реализации: шума $x(t)$ и аддитивной смеси полезного сигнала и шума $x(t) + s(t)$ для прерывистой передачи

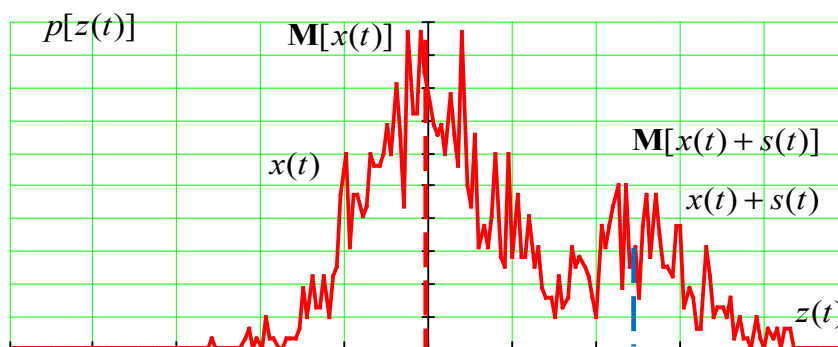


Рис. 4. Распределение входной реализации $z(t)$

Статистика теста JB определяется как

$$JB = \frac{N}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right],$$

где N — количество дискретных отчетов выборки;

S — коэффициент асимметрии выборки;

K — коэффициент эксцесса.

Проведенный эксперимент по моделированию ситуации при различных соотношениях интервалов выборки, соответствующих гипотезам $\gamma = H_0 / H_1$, позволил получить вероятность правильного принятия решения о прерывистости канала P_0 по критерию теста JB (табл. 1).

Результаты, представленные в табл. 1, получены по данным обработки случайных выборок (по 200 выборок для каждой градации γ). Обработка проводилась при отношении сигнал/шум не менее 10 дБ в канале.

Таблица 1

Оценка эффективности теста Харке — Бера

γ	<0,100	0,125	0,250	0,500	1,000	2,000	4,000	8,000	>10,000
P_0	0,75	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующее заключение. Наличие прерывистого канала, характерного для сетей широкополосного доступа технологий NR-U, требует адаптивного выбора вида энергетического обнаружителя в зависимости от вида распределения обрабатываемой реализации.

Поэтому важным моментом видится проведение предварительного анализа, позволяющего оценить степень гауссовости распределения. Для этого предлагается использовать тест Харке — Бера, основанный на учете таких показателей распределения, как асимметрии и эксцесс.

Моделирование подтвердило правомерность такого выбора. Полученная вероятность правильного выбора была не ниже 0,7, при условии, что $\gamma > 10$ и $\gamma < 0,1$.

Дальнейшие исследования авторы связывают с применением методов кратномасштабной обработки входных реализаций [27, 28].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Роенков Д. Н., Плеханов П. А. Мобильные сети поколения 5G: перспективы применения // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 10. С. 2–7. DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.001.
2. Метод четырехчастотной инициализации каналов связи транспортного домена сетей 5G / А. Ал. Василец, А. Ан. Василец, А. Аль-Муфти [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 11. С. 339–342.
3. Карпов И. В. Беспроводная экскурсионная система с активными метками на основе стандарта IEEE 802.15.4 // Инновационные информационные технологии: материалы Второй научно-практической конференции (Прага, Чехия, 22–26 апреля 2013 г.). Т. 4. Инновационные информационные технологии в экономической и социальной сферах. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 86–90.
4. Hu F., Chen B., Zhu K. Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 15754–15776. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
5. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А. Обобщенная функциональная модель радиолинии с управлением ее частотным ресурсом // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. 2016. Вып. 3. С. 49–56.
6. Akhtar A. N., Arif F., Siddique A. M. Spectrum Decision Framework to Support Cognitive Radio Based IoT in 5G // Cognitive Radio in 4G/5G Wireless Communication Systems / S. S. Moghaddam (ed.). Rijeka: IntechOpen, 2018. Pp. 73–92. DOI: 10.5772/intechopen.80991.
7. Дворников С. В., Крячко А. Ф., Пшеничников А. В. Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (WECONF–2019): сборник статей XXII Международной научной конференции (Санкт-Петербург, Россия, 03–07 июня 2019 г.): в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2019. С. 84–89.
8. Фролов А. А. Анализ современных стандартов: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a для применения в СШП-системах // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 9. С. 144–148.
9. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Conventional Energy Detector // Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio. New York: Springer, 2014. Pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-1-4939-0494-5_2.
10. Дворников С. В., Алексеева Т. Е. Распределение Алексеева и его применение в задачах частотно-временной обработки сигналов // Информация и космос. 2006. № 3. С. 9–20.
11. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. А. Русин, А. С. Дворников // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. 2014. Вып. 2. С. 51–56.
12. Бокова Е. А., Поветко В. Н., Полев В. Ю. Моделирование многоканального энергетического обнаружителя для DMR радиосистем // Теория и техника радиосвязи. 2023. № 2. С. 15–20.
13. Barela M. C., Marciano J. S. An Empirical Study on the Performance of a Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio // Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), (Sydney, Australia, 07–10 September 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. Pp. 474–479. DOI: 10.1109/WPMC.2014.7014865.
14. Efficient Energy Detection Methods for Spectrum Sensing Under Non-Flat Spectral Characteristics / S. Dikmese, P. C. Sofotasios, T. Ihalainen [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015. Vol. 33, Iss. 5. Pp. 755–770. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2361074.
15. Düzenli T., Akay O. A New Method of Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Dynamic and Randomly Modelled Primary Users // IETE Journal of Research. 2022. Vol. 68, Iss. 2. Pp. 967–965. DOI: 10.1080/03772063.2019.1628668.
16. Arjoune Y., Kaabouch N. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions // Sensors. 2019. Vol. 19, Iss. 1. Art. No. 126. 32 p. DOI: 10.3390/s19010126.
17. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных распределений / С. В. Дворников, А. И. Осадчий, С. С. Дворников, Д. В. Родин // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 46–54.

18. Aneja B., Sharma K., Rana A. Spectrum Sensing Techniques for a Cognitive Radio Network // *Advances in System Optimization and Control: Select Proceedings of ICAEDC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 509 / S. N. Singh [et al.] (eds.). Singapore: Springer Singapore, 2019. Pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-981-13-0665-5_11.
19. Lemons D. S. *An Introduction to Stochastic Processes in Physics*. Baltimore (MD): The Johns Hopkins University Press, 2002. 128 p.
20. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой / С. В. Дворников, С. С. Дворников, С. С. Мананенко, А. В. Пшеничников // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2016. Т. 12, № 2. С. 87–93.
21. Ameijeiras-Alonso J., Crujeiras R. M., Rodríguez-Casal A. Mode Testing, Critical Bandwidth and Excess Mass // *Test*. 2019. Vol. 28, Iss. 3. Pp. 900–919. DOI: 10.1007/s11749-018-0611-5.
22. A HOS-Based Blind Spectrum Sensing in Noise Uncertainty / A. Subekti, Sugihartono, N. R. Syambas, A. B. Suksmono // *Journal of ICT Research and Applications*. 2015. Vol. 9, No. 1. Pp. 20–38. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2015.9.1.2.
23. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией / С. В. Дворников, С. С. Дворников, Р. В. Иванов [и др.] // *Информационные технологии*. 2017. Т. 23, № 3. С. 193–198.
24. Леньшин А. В., Тихомиров Н. М., Шаталов Е. В. Определение спектра шумов помех дробности в непрерывной нелинейной модели системы фазовой автоподстройки // *Телекоммуникации*. 2017. № 12. С. 2–6.
25. Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 4 (101). С. 62–68. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68.
26. A Spectrum Sensing Algorithm Based on Statistic Tests for Cognitive Networks Subject to Fading / F. B. S. de Carvalho, J. S. Rocha, W. T. A. Lopes, M. S. Alencar // *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, (Lisbon, Portugal, 01–05 September 2014). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 850–854.
27. Дворников С. В., Дворников С. С., Жеглов К. Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // *T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт*. 2022. Т. 16, № 11. С. 15–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
28. Формирование векторов признаков для систем видеонаблюдения / Д. В. Васильева, С. С. Дворников, Ю. Е. Толстуха [и др.] // *Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения*. 2023. Вып. 4. С. 62–68.

Дата поступления: 23.05.2025

Решение о публикации: 27.05.2025

Selection of a Test for the Type of Input Distribution in 5G Network Channels

- Sergey V. Dvornikov**¹ — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, Honored Inventor of the Russian Federation. Research interests: communication theory, noise immunity of info-communication channels of radio engineering systems, methods of joint time-frequency signal processing. E-mail: practicsdv@yandex.ru
- Elena V. Kazakevich**² — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Electrical Communication Department. Research interests: telecommunication systems, systems and means of power supply of telecommunication devices. E-mail: kev-pgups@yandex.ru
- Anna A. Maslova**² — Postgraduate Student, Department of Electrical Communications, specialty 2.2.15 “Systems, networks and telecommunication devices”. Research interests: development and improvement of research methods, modelling and design of networks, systems and devices of telecommunications. E-mail: bloodyelis@yandex.ru
- Elena I. Roldugina**³ — Scientific Researcher of 31st Department, 3rd the Scientific Research Department of the Scientific Research Center for Telecommunication Technologies of WWII and Intelligence. Research interests: digital signal processing and broadband access systems. E-mail: zla-toustova88@mail.ru
- Yuliya E. Arnadskaya**² — 5th-year student of the 23.05.05 programme “Train Traffic Control Systems”. Research interests: radio engineering systems in railway transport, application of intelligent technologies in railway transport. E-mail: arnadskayaa@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

³Scientific Research Institute for Operational and Strategic Studies, Military Educational and Scientific Centre of the Navy “The Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G.Kuznetsov”, 17/1 Ushakovskaya emb., Saint Petersburg, 197045, Russia

For citation: Dvornikov S. V., Kazakevich E. V., Maslova A. A., Roldugina E. I., Arnadskaya Yu. E. Selection of a Test for the Type of Input Distribution in 5G Network Channels. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 83–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-83-92. (In Russian)

Abstract. *The relevance of the proposed study is determined by the fact that, in the context of the development of digital remote control systems for elements of the railway transport infrastructure based on 5G technology, the need for analyzing the transmission-reception channel and the operating principle of the energy detector has increased. The present paper proposes the test selection analysis for the type of input distribution in 5G channels. **Purpose:** to minimize the occurrence of collisions in communication channels that are the result of erroneous analysis of the input implementation. **Methods:** theoretical and empirical-analytical analysis of the efficiency of signal detection methods in case of intermittent transmissions. **Results:** the experiment was conducted with the objective of simulating random samples with a signal-to-noise ratio of no less than 10 dB in the channel. The probability of the correct decision on channel intermittency of no less than 0.7 obtained as a result of modelling confirmed the validity of choosing the Jarque–Bera test for analyzing channels with intermittent transmission. **Conclusion and novelty:** the author’s contribution to the issue under consideration is the development of a concept for conducting a preliminary analysis of the input implementation, with distribution indicators such as asymmetry and excess being taken into account. In the future, this will form the basis for constructing an adaptive energy detector that will operate according to the type of distribution of the processed implementation. **Practical significance:** the findings can be utilized to enhance the reliability and precision of energy detectors in wireless communication systems, particularly in scenarios where statistical data is limited*

and channel conditions are subject to change. It is evident that, given a priori information on signal distribution, the optimization of the detector setup process and the reduction of response time can be achieved.

Keywords: NR-U technology, energy detector, Jarque–Bera test, broadband access, intermittent transmission channel

REFERENCES

1. Roenkov D. N., Plekhanov P. A. Mobilnye seti pokoleniya 5G: perspektivy primeneniya [Mobile Networks of the 5G Generation: Application Prospects], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2020, No. 10, Pp. 2–7. DOI: 10.34649/AT.2020.10.10.001. (In Russian)
2. Vasilets A. Al., Vasilets A. An., Al-Mufti A., et al. Metod chetyrekhchastotnoy initsializatsii kanalov svyazi transportnogo domena setey 5G [The Four-Frequency Initialization Method for 5G Transport Domain Communication Channels], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]*, 2023, No. 11, Pp. 339–342. (In Russian)
3. Karpov I. V. Besprovodnaya ekskursionnaya sistema s aktivnymi metkami na osnove standarta IEEE 802.15.4 [A Wireless Excursion System with Active Tags Based on IEEE 802.15.4 Standard], *Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii: materialy Vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative Information Technologies: Materials of the Second International Scientific and Practical Conference]*, Prague, Czech Republic, April 22–26, 2013. Vol. 4. Moscow, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, 2013, Pp. 86–90. (In Russian)
4. Hu F., Chen B., Zhu K. Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, Pp. 15754–15776. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
5. Dvornikov S. V., Pshenichnicov A. V., Rusin A. A. Obobshchennaya funktsionalnaya model radiolinii s upravleniem ee chastotnym resursom [Generalized Functional Model of a Radio Link Control Its Frequency Resource], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2016, Iss. 3, Pp. 49–56. (In Russian)
6. Akhtar A. N., Arif F., Siddique A. M. Spectrum Decision Framework to Support Cognitive Radio Based IoT in 5G. In: *Moghaddam S. S. (ed.) Cognitive Radio in 4G/5G Wireless Communication Systems*. Rijeka, IntechOpen, 2018, Pp. 73–92. DOI: 10.5772/intechopen.80991.
7. Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Modelirovanie radiotekhnicheskikh sistem v konfliktnykh situatsiyakh kognitivnogo kharaktera [Research of Radio Engineering Systems in Conflict Situations of Cognitive Character], *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy (WECONF–2019): sbornik statey XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Wave Electronics and Infocommunication Systems (WECONF–2019): Proceedings of the XXII International Scientific Conference]*, Saint Petersburg, Russia, June 03–07, 2019. Part 2. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019, Pp. 84–89. (In Russian)
8. Frolov A. A. Analiz sovremennykh standartov: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a dlya primeneniya v SSHP-sistemakh [Analysis of the Current Standards: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a], *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport [T-Comm — Telecommunications and Transport]*, 2012, No. 9, Pp. 144–148. (In Russian)
9. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Conventional Energy Detector. In: *Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*. New York, Springer, 2014, Pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-1-4939-0494-5_2.
10. Dvornikov S. V., Alekseeva T. E. Raspredelenie Alekseeva i ego primenenie v zadachakh chastotno-vremennoy obrabotki signalov [Alekseev Distribution and Its Application in Time-Frequency Signal Processing Problems], *Informatiya i kosmos [Information and Space]*, 2006, No. 3, Pp. 9–20. (In Russian)
11. Dvornikov S. V., Pshenichnicov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Povyshenie pomekhoustoychivosti signalov KAM-16 s transformirovannymi sozvezdizhami [Increased Noise Immunity Signal 16-QAM Constellation with Transformed], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2014, Iss. 2, Pp. 51–56. (In Russian)
12. Bokova Ye. A., Povetko V. N., Polev V. Yu. Modelirovanie mnogokanalnogo energeticheskogo obnaruzhitelya dlya DMR radiosistem [Simulation of a Multichannel Energy Detector for DMR Radio Systems], *Teoriya i tekhnika radiosvyazi [Theory and Technology of Radio Communication]*, 2023, No. 2, Pp. 15–20. (In Russian)
13. Barela M. C., Marciano J. S. An Empirical Study on the Performance of a Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio, *Proceedings of the 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*,

Sydney, Australia, September 07–10, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, Pp. 474–479. DOI: 10.1109/WPMC.2014.7014865.

14. Dikmese S., Sofotasios P. C., Ihalainen T., et al. Efficient Energy Detection Methods for Spectrum Sensing Under Non-Flat Spectral Characteristics, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, Vol. 33, Iss. 5, Pp. 755–770. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2361074.

15. Düzenli T., Akay O. A New Method of Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Dynamic and Randomly Modelled Primary Users, *IETE Journal of Research*, 2022, Vol. 68, Iss. 2, Pp. 967–965. DOI: 10.1080/03772063.2019.1628668.

16. Arjoune Y., Kaabouch N. A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions, *Sensors*, 2019, Vol. 19, Iss. 1, Art. No. 126, 32 p. DOI: 10.3390/s19010126.

17. Dvornikov S. V., Osadchy A. I., Dvornikov S. S., Rodin D. V. Demodulyatsiya signalov na osnove obrabotki ikh modifitsirovannykh raspredeleniy [Demodulation Based on Processing the Modified Distributions], *Kontrol. Diagnostika [Testing. Diagnostics]*, 2010, No. 10, Pp. 46–54. (In Russian)

18. Aneja B., Sharma K., Rana A. Spectrum Sensing Techniques for a Cognitive Radio Network. In: Singh S. N., et al. (eds.) *Advances in System Optimization and Control: Select Proceedings of ICAEDC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 509*. Singapore, Springer Singapore, 2019, Pp. 133–144. DOI: 10.1007/978-981-13-0665-5_11.

19. Lemons D. S. An Introduction to Stochastic Processes in Physics. Baltimore (MD), The Johns Hopkins University Press, 2002, 128 p.

20. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Manaenko S. S., Pshenichnicov A. V. Spektralno-effektivnye signaly s nepreryvnoy fazoy [Spectral-Efficient Signal with the Continuous Phase], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State Technical University]*, 2016, Vol. 12, No. 2, Pp. 87–93. (In Russian)

21. Ameijeiras-Alonso J., Crujeiras R. M., Rodríguez-Casal A. Mode Testing, Critical Bandwidth and Excess Mass, *Test*, 2019, Vol. 28, Iss. 3, Pp. 900–919. DOI: 10.1007/s11749-018-0611-5.

22. Subekti A., Sugihartono, Syambas N. R., Suksmono A. B. A HOS-Based Blind Spectrum Sensing in Noise Uncertainty, *Journal of ICT Research and Applications*, 2015, Vol. 9, No. 1, Pp. 20–38. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2015.9.1.2.

23. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Ivanov R. V., et al. Zashchita ot strukturnykh pomekh radiokanalov s chastotnoy manipulyatsiyey [Protection of Structural Noise Radio Channel Frequency Shift Keying], *Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies]*, 2017, Vol. 23, No. 3, Pp. 193–198. (In Russian)

24. Lenshin A. V., Tikhomirov N. M., Shatalov E. V. Opredelenie spektra shumov pomekh drobnosti v nepreryvnoy nelineynoy modeli sistemy fazovoy avtopodstroyki [Determination of Fractional Interference Noise Spectrum in Continuous Nonlinear Model of Phase-Locking System], *Telekommunikatsii [Telecommunications]*, 2017, No. 12, Pp. 2–6. (In Russian)

25. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Apparat analiza chastotnogo resursa dlya rezhima psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoty [Analysis of Frequency Resource for FHSS Mode], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2019, No. 4 (101), Pp. 62–68. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68 (In Russian).

26. de Carvalho F. B. S., Rocha J. S., Lopes W. T. A., Alencar M. S. A Spectrum Sensing Algorithm Based on Statistic Tests for Cognitive Networks Subject to Fading, *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lisbon, Portugal, September 01–05, 2014*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. Pp. 850–854.

27. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Zheglov K. D. Proaktivnyy kontrol prigodnosti radiokanalov v rezhime PPRCh [Proactive Suitability Control of Radio Channels in IFB Mode], *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2022, Vol. 16, No. 11, Pp. 15–20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. (In Russian)

28. Vasilyeva D. V., Dvornikov S. S., Tolstukha Yu. E., et al. Formirovanie vektorov priznakov dlya sistem videonablyudeniya [Formation of Feature Vectors for Video Surveillance Systems], *Voprosy Radioelektroniki, Seriya Tekhnika Televideniya*, 2023, No. 4, Pp. 62–68. (In Russian)

Received: 23.05.2025

Accepted: 27.05.2025

УДК 622.621

Система автоматического тестирования технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации

- Наседкин Олег Андреевич** — канд. техн. наук, доцент, руководитель испытательного центра. Научные интересы: методы доказательства безопасности железнодорожной автоматики, нормативное, организационное и методическое обеспечение процесса разработки систем на современной элементной базе. E-mail: nasedkin@crtc.spb.ru
- Васильев Денис Анатольевич** — старший научный сотрудник. Научные интересы: разработка средств испытаний программного обеспечения систем железнодорожной автоматики. E-mail: denvas@crtc.spb.ru
- Бутузов Максим Алексеевич** — старший научный сотрудник, руководитель экспертного отдела. Научные интересы: экспертная оценка безопасности систем, методическое обеспечение процесса испытаний на безопасность. E-mail: max@crtc.spb.ru

Испытательный центр железнодорожной автоматики и телемеханики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Наседкин О. А., Васильев Д. А., Бутузов М. А. Система автоматического тестирования технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 93–102. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-93-102

Аннотация. Актуальность автоматизированного тестирования технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации обусловлена критической ролью железнодорожной автоматики в обеспечении безопасности движения. **Введение:** с ростом сложности программных компонентов МПЦ методы ручного тестирования становятся недостаточно эффективными. **Цель:** разработка системы автоматического тестирования ТПО МПЦ на основе скриптового подхода, обеспечивающей полноту проверки функциональных требований и корректности реализации алгоритмов. **Методы:** гибридный подход, сочетающий скриптовый язык Lua для описания тестовых сценариев, виртуальную среду имитации работы напольного оборудования, автоматическую генерацию тестов и интеграцию с экспертной системой анализа протоколов. **Результаты:** модульная система тестирования, включающая: библиотеку тестовых скриптов, интерпретатор со специализированным API для взаимодействия с ТПО, механизмы автоматической валидации. **Практическая значимость:** доказана эффективность подхода на реальных конфигурациях МПЦ. Определены направления развития: интеграция с CI/CD, расширение покрытия тестами отказоустойчивости. **Обсуждение:** выявлены преимущества скриптового подхода: независимость тестов от конкретной станции, возможность повторного использования сценариев.

Ключевые слова: микропроцессорная централизация, технологическое ПО, автоматическое тестирование, скриптовые тесты, железнодорожная автоматика, язык программирования Lua, виртуальная среда

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); **2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

Обеспечение технологической безопасности [1] является одной из задач, которые реализуют системы железнодорожной автоматики (СЖАТ) в общем контексте обеспечения безопасности функционирования. Характерной особенностью современных СЖАТ является реализация средствами программного обеспечения большей части функций, в том числе и технологических. Поэтому в микропроцессорных СЖАТ (МП СЖАТ) программное обеспечение становится одним из ключевых компонентов системы, определяющих их уровень безопасности. В процессе проведения работ по обеспечению и доказательству безопасности МП СЖАТ значительная часть усилий должна быть направлена на оценку безопасности программного обеспечения.

Методы и средства оценки программного обеспечения

Широко используемый сегодня подход нормирования уровня безопасности разрабатываемых систем в виде вероятностных показателей позволяет учитывать стохастическую природу ошибок проектирования и программирования при реализации расчетных методов оценки безопасности. Однако в основе этой оценки лежит практическое подтверждение полноты и корректности реализации прикладных задач средствами программного обеспечения. В этих условиях процесс доказательства безопасности ПО в составе систем управления заключается в последовательном, поэтапном подтверждении правильности решаемой задачи от момента определения исходных требований к системе до их интеграции в единую систему.

Такой подход предполагает использование различных средств экспертизы и испытаний на всех стадиях разработки микропроцессорных систем ЖАТ. Для каждой из них должны быть установлены требования, на соответствие которым нужно проверять систему согласно принятой последовательности ее разработки.

В системах микропроцессорных централизаций технологические функции системы реализуются в технологическом программном обеспечении (ТПО), которое играет роль технологического «ядра» системы, принимая решение о допустимости выполнения тех или иных команд оператора в процессе управления станционными объектами и реализации тех или иных технологических алгоритмов. В этом случае под безопасностью ТПО будем понимать корректную постановку технологических функций системы и их корректную программную реализацию. Как правило, полноту и правильность технологических функций оценивают эксперты, анализируя функциональные требования, базовый состав которых отражен в соответствующих нормативных документах [2]. Принимаются во внимание также архитектурные аспекты реализации ТПО с целью возможности его корректного тиражирования и функционального расширения.

ТПО обладает высокой степенью сложности, поскольку реализует взаимозависимости и при этом реализуется в значительной мере независимо от базового и системного программного обеспечения. Такие свойства ТПО обуславливают возможность и необходимость проведения его тестирования не только в составе системы МПЦ, но и отдельно от нее, с использованием специально разработанных программных имитаторов. Функциональная структура имитатора для проведения испытаний технологического программного обеспечения приведена на рис. 1.

Основная задача проверки технологического ПО с использованием данного имитатора состоит в проверке правильности обработки ТПО поступающей информации (входные директивы дежурного по станции (ДСП), состояние napольных объектов) и полноты реализуемых ТПО функций.

Рассмотрим функциональные возможности представленной структуры, назначение ее основных модулей и их взаимодействие.

В процессе испытаний оператор, используя меню команд и отображение плана станции на экране, формирует директивы двух типов:

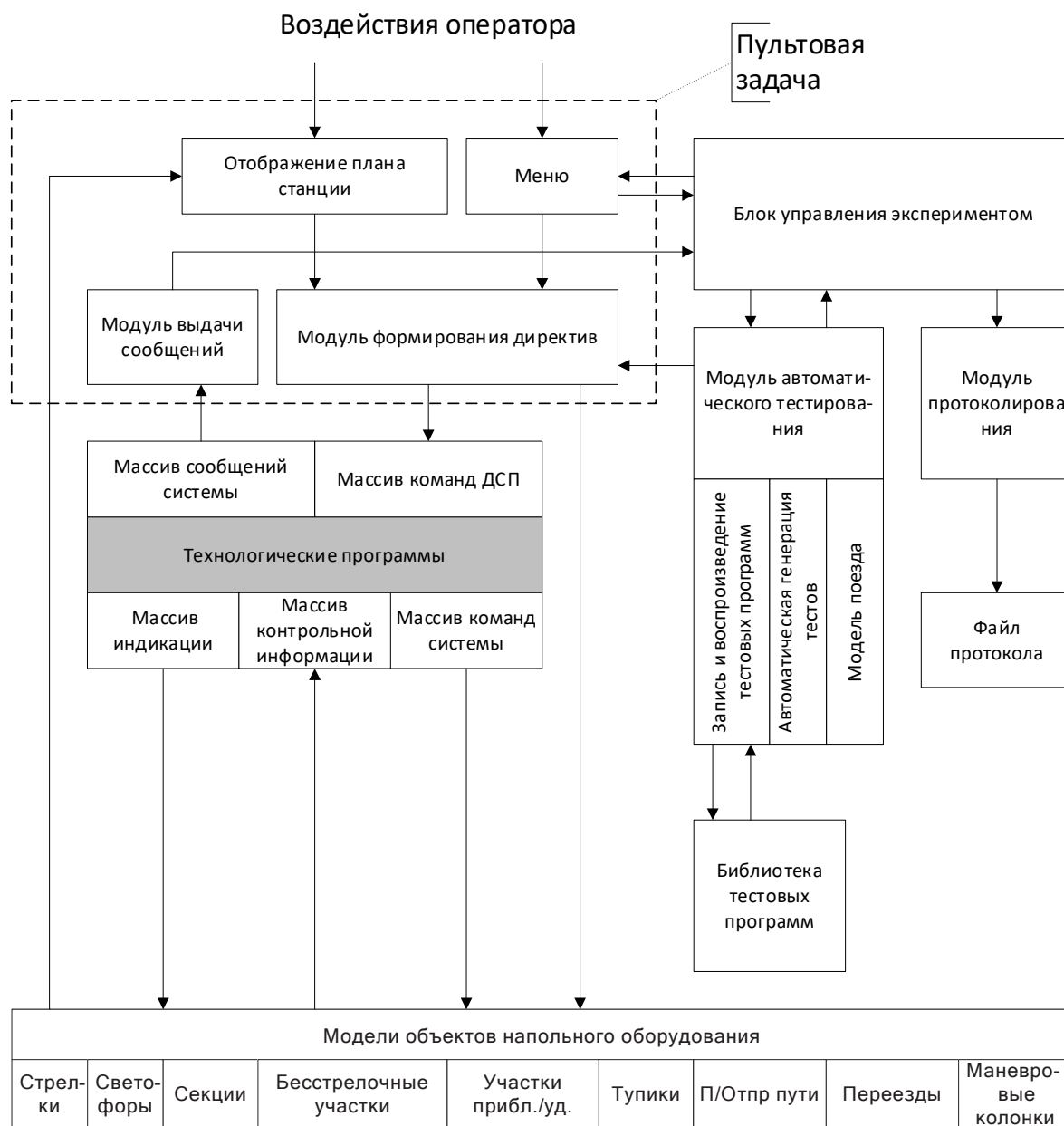


Рис. 1. Функциональная структура имитатора для проведения испытаний ТПО

- управляющих директив дежурного по станции;
- директив изменения состояния напольного оборудования.

Модуль выдачи сообщений обрабатывает информацию, получаемую из массива сообщений системы. Информация о сообщениях системы выводится на экран и в файл протокола.

Модули отображения плана станции, меню команд, формирования директив и выдачи сообщений в совокупности реализуют экранный интерфейс имитатора.

Модели объектов напольного оборудования имитируют работу реальных устройств, а также выполняют отображение их состояния на плане станции. Из системы МПЦ на модели объектов напольного оборудования поступает следующая информация:

- команды системы (через массив команд системы);
- информация для отображения состояния объектов (через массив индикации).

Модуль автоматического тестирования обеспечивает проведение испытаний в автоматическом

режиме, а также процесс формирования тестовых программ в ручном режиме работы. Формируемый файл тестовой программы включается в состав библиотеки тестовых программ. Тестовая программа, включенная в библиотеку, может быть воспроизведена неограниченное количество раз в автоматическом режиме работы. Кроме воспроизведения заранее записанной тестовой программы в имитаторе есть возможность автоматической генерации тестов по заданным алгоритмам (модуль автоматической генерации тестов) или автоматической имитации движения поезда по путевому развитию станции (модель поезда).

Модуль протоколирования обеспечивает ведение протокола испытаний. Возможны два режима протоколирования: основной и дополнительный. В основном режиме в протокол заносятся все формируемые в имитаторе директивы, изменения в состоянии напольного оборудования и сообщения, генерируемые технологическими программами. В дополнительном режиме, кроме того, фиксируются все изменения в массивах обмена информацией между имитатором и испытуемой системой, что позволяет проверить отсутствие несанкционированных управляющих воздействий со стороны технологических программ системы МПЦ.

Блок управления экспериментом управляет взаимодействием программных модулей имитатора в ручном и автоматическом режимах, а также обеспечивает режимы приостановки процесса имитации, пошаговой работы имитатора и изменение масштаба времени имитации.

Использование такого подхода, когда испытание ТПО проводится вне реального аппаратного и программного обеспечения — посредством средств виртуализации — имеет ряд преимуществ:

- возможность управления генерацией входных воздействий. Программные имитаторы задают произвольную последовательность входных данных в сочетании с наиболее неблагоприятными состояниями систем, что в условиях эксплуатации практически невозможно;
- возможность изменения интенсивности воздействия на испытываемый объект, что в значительной степени сокращает сроки испытаний;

– возможность программной имитации произвольной среды функционирования с учетом степени готовности системы на данном этапе разработки.

Примеры имитаторов для испытаний ТПО и специфика их построения описаны в [3].

Существуют различные подходы к тестированию программного обеспечения. Наиболее распространенным является деление подходов на тестирование по методу «черного ящика» и «белого ящика». В случае «черного ящика» для проектирования тестов используются внешние требования к ТПО, и целью является проверка соответствия реализации ТПО этим требованиям. При использовании подхода «белого ящика» тесты проектируются исходя из знания о структуре конкретной реализации ТПО.

Оба подхода применяются при тестировании ТПО, но использование метода «белого ящика» более типично для тестирования организацией-разработчиком в процессе реализации. При проведении экспертизы или декларировании ТПО при реализации процедуры оценки соответствия основным подходом является метод «черного ящика», реализующий функциональное тестирование, «процесс, нацеленный на выявление расхождений между поведением программы и внешней спецификацией» [4]. В случае с ТПО внешней спецификацией являются требования к технологическим функциям, реализуемым в ТПО. Например, при проверке реализации в ТПО технологической функции перевода стрелки (индивидуального или маршрутного) необходимо проверить, что для выдачи команды на перевод стрелки ТПО проверяет свободу секции, в которую входит данная стрелка, и неучастие ее в другом маршруте.

При тестировании ТПО возможны два основных режима: ручной, при котором тесты формируются тестировщиком вручную, и автоматический, при котором воздействия на ТПО и проверки результатов генерируются в соответствии с заданным алгоритмом в соответствии с выбранной методикой.

Автоматическое тестирование имеет ряд безусловных преимуществ перед ручным тестированием. По словам Б. Бейзера, «требование надежности обуславливает использование автоматического те-

стирования» [5]. В [6] отмечается, что «сравнение ручного и автоматизированного подхода показывает тенденцию современного тестирования, ориентирующуюся на максимальную автоматизацию процесса тестирования и генерацию тестового кода». Хотя построение автоматических тестов не всегда является тривиальной задачей, что усложняет внедрение автоматического тестирования, тем не менее несомненна необходимость максимально увеличить долю автоматических тестов в общем объеме испытаний.

При проведении автоматического тестирования необходимо обеспечить проверку корректности поведения тестируемого ТПО. Это может быть реализовано как в самом тесте, когда формируются тестовые воздействия с заранее известным результатом, так и с помощью внешней экспертной системы, получающей на вход протокол испытаний и выдающей предупреждения о некорректном поведении ТПО. Подробно тема применения экспертной программы в имитаторе для испытаний ТПО МПЦ рассмотрена в [7].

Можно выделить два основных подхода к автоматизации проектирования тестов: захват/воспроизведение данных и разработка специализированной программы — генератора тестов [5]. Оба этих метода применимы для тестирования ТПО МПЦ.

При использовании метода захвата/воспроизведения данных воздействия оператора в процессе ручного тестирования на имитаторе версии ТПО для конкретной станции, а также реакция ТПО записываются в виде тестового сценария, который может быть воспроизведен в автоматическом режиме. Преимуществом этого подхода является относительная простота получения теста. Основным недостатком этого подхода является привязка к конкретному объекту тестирования.

Специализированное программное обеспечение, порождающее тестовые воздействия по определенному алгоритму, существенно сложнее в разработке, но позволяет использовать написанные один раз тесты для любого типа ТПО на любой станции.

В составе имитатора для испытаний ТПО этот функционал реализуется системой автоматического тестирования (САТ).

Система автоматического тестирования

Система автоматического тестирования предназначена для автоматической генерации тестовых воздействий на ТПО на основе заданных алгоритмов тестирования.

На рис. 2 показана схема взаимодействия элементов САТ с имитатором для испытаний ТПО.

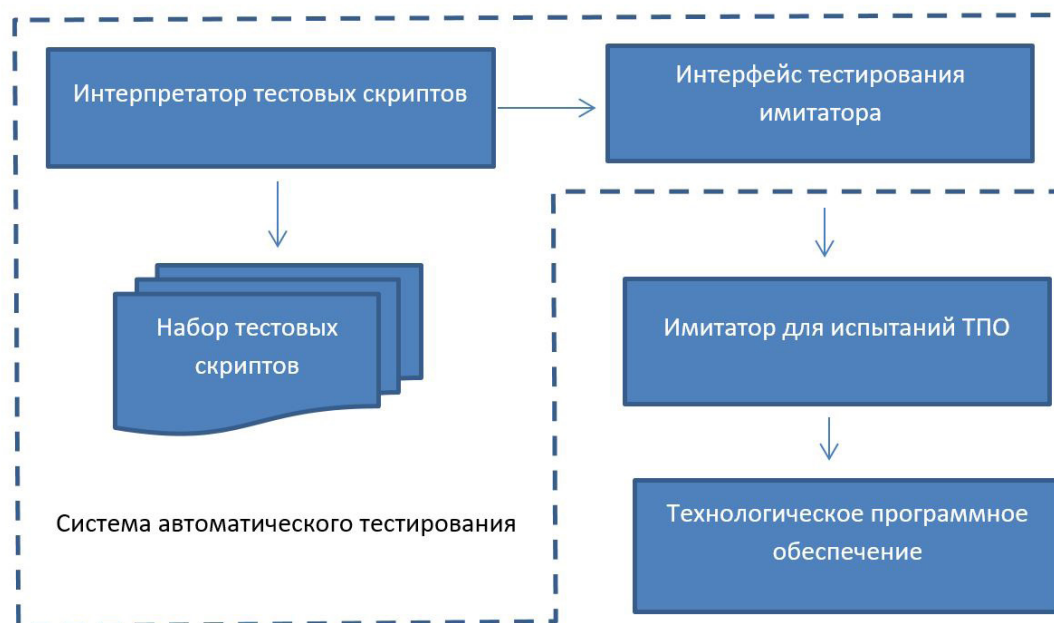


Рис. 2. Взаимодействие составных частей САТ с имитатором для испытаний ТПО

Основными составляющими САТ являются:

- набор тестовых скриптов, описывающих алгоритмы тестирования ТПО;
- интерпретатор тестовых скриптов;
- интерфейс тестирования имитатора.

Набор тестовых скриптов САТ представлен в виде файлов на скриптовом языке, распределенных по каталогам в соответствии с категориями тестов. В качестве языка для записи тестов используется язык программирования Lua.

Интерпретатор тестовых скриптов загружает скрипты, выбранные для проведения испытаний, и на их основе формирует команды и проверки для ТПО. Интерпретатор основан на стандартном интерпретаторе языка Lua, дополненном прикладным интерфейсом имитатора для тестирования.

Интерфейс тестирования имитатора предоставляет набор функций, доступных изнутри тестовых скриптов, используемых для воздействия на ТПО и проверки его реакции.

Тестовые скрипты

В САТ тесты представлены в виде тестовых скриптов. Тестовые скрипты представляют из себя текстовые файлы на языке программирования Lua, причем каждый тест описывается одним файлом. В каждом файле могут быть указаны характеристики применимости данного теста, в частности тип системы МПЦ, для которой данный тест является применимым, и станции, для которой описан данный тест. По умолчанию считается, что тест применим для любой станции и любой системы МПЦ.

Файлы тестовых скриптов могут быть распределены по директориям файловой системы, в этом случае имя директории задает общую категорию для каждого из включенных в нее тестовых файлов. Категориями могут быть, например, «тестирование перевода стрелок» или «проверка установки маршрутов». При запуске тестирования есть возможность выбрать категорию тестов, подлежащих исполнению.

Язык Lua выбран в качестве языка для тестовых скриптов в силу ряда преимуществ перед другими решениями. Язык Lua специально предназначен

для встраивания в программы на языках C и C++. Он обладает простым, но выразительным синтаксисом, включающим кроме обычных конструкций структурного программирования такие возможности, как, например, замыкания, которые широко используются для реализации тестовых скриптов. Интерпретатор языка Lua компактен, доступен в виде исходных кодов на языке C, обладает высокой степенью совместимости с различными компиляторами и платформонезависимостью [8].

Предполагается, что на момент запуска теста имитатор и ТПО находятся в исходном состоянии, эквивалентном состоянию при начальном запуске имитатора, даже если выполняется несколько тестов подряд. Это может достигаться либо перезагрузкой ТПО и моделей в имитаторе после завершения каждого теста, либо самим построением тестового скрипта. Во втором случае, если по каким-либо причинам при завершении теста имитатор не пришел в исходное состояние, это проявится при выполнении следующих тестов, что может использоваться как дополнительная проверка корректности функционирования ТПО.

Тест содержит набор манипуляций и проверок над некоторым множеством объектов тестируемой станции. Выборка объектов для проверок производится по типам объектов («стрелка», «светофор», «маршрут» и т. п.) и атрибутам объектов (например, все стрелки, входящие в заданную секцию, или все стрелки, входящие в заданный маршрут). Тесты описываются в технологических терминах именованных состояний и команд для объектов контроля и управления и логических объектов, общих для всех систем МПЦ, а не специфичных для каждого типа ТПО внешних входов или выходов.

Команды и состояния объектов задаются строковыми литералами кириллицей с использованием принятой в отрасли терминологии, что делает тестовые скрипты понятными для специалистов в области железнодорожной автоматики, но не являющихся программистами. Это, в свою очередь, облегчает разработку тестов и проверку реализации в них функциональных требований.

Интерфейс тестирования

Интерфейс тестирования предоставляет набор функций имитатора для использования из тестовых скриптов. Эти функции реализуются специальным программным модулем на языке C++, входящим в состав имитатора, и регистрируются в интерпретаторе Lua. Параметрами функций интерфейса тестирования являются переменные, задающие объекты станции, и текстовые строки, задающие команды, состояния и связи объектов. При вызове функций с некорректными параметрами в протокол тестирования будет записано сообщение об ошибке.

Рассмотрим основные функции и конструкции, поддерживаемые интерфейсом тестирования.

- `cmd()` — выполнить команду определенного типа для определенного объекта. Имитатор поддерживает следующие типы команд:

- «ДСП» — директива дежурного по станции (например, индивидуально перевести стрелку или установить маршрут).

Пример директивы дежурного на индивидуальный перевод в минус стрелки, заданной переменной *s*:

```
cmd(s, «ДСП», «перевести в минус»)
```

- «КИ» — команда имитатора, позволяющая установить состояние модели объекта контроля и управления в имитаторе (например, ввести занятость секции).

Пример команды имитатора, устанавливающей занятость секции, заданной переменной *sp*:

```
cmd(sp, «КИ», «занять»)
```

- `flag()` — получить бинарное состояние объекта. Вид состояния объекта, который можно получить:

- «СО» — физическое состояние объекта, состояние, формируемое моделями объектов контроля и управления, которое подается на входы ТПО.

Пример получения признака занятости секции, заданной переменной *sp*:

```
flag(sp, «СО», «занятость»)
```

- «СОЛ» — логическое состояние объекта, т. е. состояние, формируемое ТПО на основании контрольной информации, сформирован-

ной моделями объектов контроля и управления в имитаторе (например, логический признак занятости секции).

Пример получения признака занятости логического объекта секции, заданной переменной *sp*:

```
flag(sp, «СОЛ», «занятость»)
```

- `link()` — получить для объекта ссылку на другой объект по имени связи.

Например, следующий код присваивает переменной *sp* ссылку на секцию для стрелки, заданной переменной *s*:

```
sp = link(s, "секция")
```

- `run()` — запустить процесс имитации на заданное время.

Пример команды `run()`, запускающей моделирование на 3000 миллисекунд:

```
run(3000)
```

- `error()` — прервать выполнение тестов и выдать сообщение об ошибке. Функция `error()` используется при проверке условий.

Например, в следующем фрагменте кода проверяется наличие минусового контроля стрелки после завершения перевода:

```
if not flag(sw, "СО", "минус") then
  error("ошибка перевода в минус стрелки " ..
    name(sw))
end
```

- `int_attr()` — получить целочисленный атрибут объекта.

Например, следующий код запрашивает время перевода стрелки, заданной переменной *s*:

```
int_attr(s, "время перевода мс")
```

Важнейшей конструкцией интерфейса, используемой при построении скриптовых тестов, является итератор объектов тестирования. Эта конструкция основана на понятии итератора в том виде, в каком оно используется в языке Lua: «Итератор — это любая конструкция, которая позволяет вам перебирать элементы набора» [7]. Итератор в Lua реализован через механизм замыканий.

Итератор объектов реализован в виде функции `objects_of_type()`, получающей в качестве параметра строковый тип объекта. В тестовом скрипте итератор используется, как правило, совместно с оператором цикла для обхода всех объектов кон-

кретного типа. Например, для обхода всех стрелок используется следующая конструкция:

```
for s in objects_of_type("стрелка") do  
end
```

При выполнении цикла `for`, в теле цикла переменная `s` будет последовательно ссылаться на каждую стрелку тестируемой станции.

Для обхода маршрутов в тестовых скриптах используется специальный итератор `routes()`, не получающий параметров.

Интерпретатор тестовых скриптов

Интерпретатор тестовых скриптов — это подсистема имитатора, выполняющая следующие функции:

1. Формирование среды выполнения тестов.
2. Загрузка и выполнение файлов тестовых скриптов в зависимости от заданных оператором параметров.
3. Протоколирование процесса тестирования и выдача сообщения о результатах тестирования, в том числе информации об ошибке в случае неудачного выполнения теста.

Формирование среды выполнения тестов предполагает создание и инициализацию интерпретатора языка Lua и регистрацию в нем функций интерфейса тестирования имитатора для последующего вызова их из тестовых скриптов, а также функций обработки ошибок.

САТ предоставляет разнообразные возможности для задания набора тестов, выполняемых при конкретном запуске автоматического тестирования.

Кроме возможности выполнить конкретный тест или все тесты, есть возможность запустить все тесты одной категории или сформировать специальный файл со списком выполняемых тестов и передать его САТ. Набор таких файлов может быть использован для тестирования различных аспектов поведения ТПО. Выполнение набора тестов прекращается после первого появления сообщения об ошибке в одном из тестов. Выдача сообщения об ошибке происходит в тестовом скрипте при неудачном результате проверки условия. Сообщение об ошибке включает имя теста, в котором произошла ошибка, номер строки в файле теста и текстовое сообщение, заданное в тестовом скрипте в точке проверки условия.

Для протоколирования процесса тестирования интерпретатор использует подсистему протоколирования имитатора, в который встраивается САТ. Сообщения, вносимые в протокол, могут быть также отправлены на анализ в экспертную программу с целью выявления некорректного поведения ТПО.

Заключение

Специфика программного обеспечения как объекта разработки и экспертизы требует особого подхода в части инструментального обрамления процесса его создания и подтверждения реализации заявленных требований. Применение различных подходов к применению средств испытаний, в том числе и испытаний с использованием виртуальной внешней среды, позволяет получить интегральную оценку достигнутого уровня безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Понятийный аппарат экспертизы и испытаний на безопасность железнодорожной автоматики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 1. С. 30–45.
2. ГОСТ 33894—2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля = Railway automatics and telemechanics systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие в качестве национального стандарта приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 марта 2017 г. № 233-ст: дата введения 2017-11-01. М.: Стандартинформ, 2017. 29 с.
3. Наседкин О. А., Васильев Д. А., Белоус А. М. Методическое и техническое обеспечение испытаний микропроцессорных систем // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 12. С. 23–27.
4. Майерс Г., Баджетт Т., Сандлер К. Искусство тестирования программ. Третье издание = The Art of Software Testing. Third Edition / пер. с англ. и ред. А. Г. Гузикевича. М.: Вильямс, 2012. 272 с.

5. Бейзер Б. Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем = Black-Box Testing. Techniques for Functional Testing of Software and Systems / пер. с англ. А. Раздобарина. СПб.: Питер, 2004. 318 с.
6. Котляров В. П., Коликова Т. В. Основы тестирования программного обеспечения: учебное пособие. М.: НОУ ИНТУИТ; БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006. 285 с.
7. Экспертная программа для проведения испытаний технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации / Д. А. Васильев, С. В. Гизлер, О. А. Наседкин, М. П. Шайфер // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: сборник научных трудов / отв. ред. Вл. В. Сапожников. СПб.: ПГУПС, 2014. С. 39–42.
8. Иерузалымски Р. Программирование на языке Lua. Третье издание = Programming in Lua. Third Edition / пер. с англ. А. В. Борескова. М.: ДМК Пресс, 2016. 382 с.

Дата поступления: 13.05.2025

Решение о публикации: 24.05.2025

Automated Testing of Software Reliability for Computer-Based Interlocking systems

Oleg A. Nasedkin — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Testing Center. Research interests: methods of proving the safety of railway automation; regulatory, organizational and methodological support for the development of systems based on modern elements. E-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

Denis A. Vasiliev — Senior Researcher. Research interests: development of software testing tools for railway automation systems. E-mail: denvas@crtc.spb.ru

Maksim A. Butuzov — Senior Researcher, Head of the Expert Department. Research interests: expert assessment of system safety, methodological support of the safety testing process. E-mail: max@crtc.spb.ru

The Testing Center of Railway Automation and Telemechanics, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Nasedkin O. A., Vasiliev D. A., Butuzov M. A. Automated Testing of Software Reliability Computer-Based Interlocking systems. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 93–102. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-93-102. (In Russian)

Abstract. Automated testing of technological software for computer-based interlocking systems is of critical importance in ensuring the safety of railway traffic. **Introduction:** as the CBI software components become more complex, so manual testing methods are no longer adequate. **Purpose:** to develop an automated testing system for the CBI software based on a scripting approach that ensures the overall verification of functional requirements and the correctness of the algorithms. **Methods:** a hybrid approach combining the Lua scripting language for describing test scenarios, a virtual environment for simulating the operation of outdoor equipment, automatic test generation, and the integration with an expert protocol analysis system. **Results:** a modular testing system that includes a library of test scripts, an interpreter with a specialized API for interacting with the computer software, and automatic validation mechanisms have been designed. **Practical significance:** the approach demonstrated its effectiveness in real CBI configurations. The development directions have been outlined as follows: integration with CI/CD and expansion of coverage with fault tolerance tests. **Discussion:** the research has revealed the advantages of the script approach. These include the independence of tests from a specific station and the possibility of reusing scripts.

Keywords: computer based interlocking, microprocessor interlocking, technological software, automated testing, script tests, railway automation, Lua programming language, virtual environment

REFERENCES

1. Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasil'ev D. A., Butuzov M. A. Ponyatiyny apparat ekspertizy i ispytaniy na bezopasnost zheleznodorozhnoy avtomatiki [Definitions and Terminology of Expertise and Testing of Railway Automation for Safety], *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, 2018, Vol. 4, No. 1, Pp. 30–45. (In Russian)
2. GOST 33894—2016. Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnykh stantsiyakh. Trebovaniya bezopasnosti i metody kontrolya [GOST 33894—2016. Railway automatics and telemechanics systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking]. Effective from November 01, 2017. Moscow, StandartInform Publishing House, 2017, 29 p. (In Russian)
3. Nasedkin O. A., Vasilyev D. A., Belous A. M. Metodicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie ispytaniy mikroprotssessornykh system [Methodological and technical support for testing microprocessor systems], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2013, No. 12, Pp. 23–27. (In Russian)
4. Myers G. J., Badgett T., Sandler C. Iskusstvo testirovaniya programm. Tretye izdanie [The Art of Software Testing. Third Edition]. Moscow, Williams Publishing House, 2012, 272 p. (In Russian)
5. Beizer B. Testirovanie chernogo yashchika. Tekhnologii funktsionalnogo testirovaniya programmogo obespecheniya i sistem [Black-Box Testing. Techniques for Functional Testing of Software and Systems]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2004, 318 p. (In Russian)
6. Kotlyarov V. P., Kolikova T. V. Osnovy testirovaniya programmogo obespecheniya: uchebnoe posobie [Fundamentals of Software Testing: a tutorial]. Moscow, INTUIT, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 285 p. (In Russian)
7. Vasiliev D. A., Ghizler S. V., Nasedkin O. A., Shaifer M. P. Ekspertnaya programma dlya provedeniya ispytaniy tekhnologicheskogo programmogo obespecheniya sistem mikroprotssessornoy tsentralizatsii [The Expert Program for Computer Based Interlocking Application Software Test], *Razvitie elementnoy bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sbornik nauchnykh trudov [Component Base Development and Railway Automation and Remote Control Devices Design Methods Improvement: Scientific Proceeding]*. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University, 2014, Pp. 39–42. (In Russian)
8. Ierusalimsky R. Programmirovaniye na yazyke Lua. Tretye izdanie [Programming in Lua. Third Edition]. Moscow, DMK Press, 2016, 382 p. (In Russian)

Received: 13.05.2025

Accepted: 24.05.2025

УДК 004.021

Методика парирования сбоев и отказов в многомодульной вычислительной системе на основе создания и репликации контрольных точек

Кочуров Денис — адъюнкт кафедры информационно-вычислительных систем и сетей.
Анатолевич Научные интересы: отказоустойчивые вычислительные системы.
E-mail: deniskochurov45@yandex.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

Для цитирования: Кочуров Д. А. Методика парирования сбоев и отказов в многомодульной вычислительной системе на основе создания и репликации контрольных точек // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 103–112. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-103-111

Аннотация. Задача по повышению оперативности обработки целевой информации требует новых подходов к возможности быстрого восстановления вычислительной системы после сбоев и отказов. **Цель:** описать методику парирования сбоев и отказов в многомодульной вычислительной системе, которая реализует периодическое сохранение состояния вычислений (контрольных точек) и обмен ими между всеми вычислительными модулями. **Результаты:** сформулирована постановка задачи планирования такого вычислительного процесса, предполагающая определение оптимального количества и моментов времени создания контрольных точек. Обоснованы моменты времени создания контрольных точек в зависимости от закона распределения моментов времени отказов вычислительных модулей. **Практическая значимость:** представлены результаты имитационного моделирования вычислений в рамках предлагаемого подхода, доказывающие целесообразность применения предлагаемой методики.

Ключевые слова: многомодульная вычислительная система, модель вычислительного процесса, контрольная точка

2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки);
1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

В настоящее время широко применяются многомодульные вычислительные системы, функционирующие в составе автоматизированных систем в условиях возмущающих факторов среды. Примерами таких систем могут быть как бортовые, так и наземные вычислительные комплексы различного назначения. Функционирование вычислительных комплексов в реальном масштабе времени создает проблему необходимости их быстрого восстановления после сбоев и отказов или парирования этих отказов на основе структурной и временной избыточности.

Известным подходом к решению этой проблемы является создание «контрольных точек» [1–3], то есть периодическое сохранение состояния программы на некоторый носитель данных. В случае отказа вычислительного модуля (ВМ) производится «откат» к ближайшей доступной контрольной точке. В восстанавливаемой вычислительной системе после отказа ее ВМ он перезапускается, и вычисления продолжают на том же ВМ. При функционировании невосстанавливаемого ВМ созданная им до отказа контрольная точка реплицируется на один или несколько других ВМ вычис-

лительной системы, и программа, выполняемая на отказавшем ВМ, возобновляется с последней контрольной точки на исправном ВМ.

В статье рассматривается многомодульная вычислительная система, в которой каждый ВМ периодически сохраняет состояние своего активного вычислительного процесса (создает контрольную точку) и передает ее другим ВМ в рамках проактивной реакции на свой отказ. Если такой отказ происходит, то возможно восстановление прерванных вычислений с контрольной точки на другом ВМ.

В отличие от известных работ [4, 5], предлагаемый в статье подход не требует выделенного запоминающего устройства для хранения контрольных точек, не ограничивается рассмотрением одного вида распределения моментов времени деструктивных воздействий на вычислительную систему и позволяет обосновать моменты времени создания контрольных точек в зависимости от вида этого распределения.

Постановка задачи планирования репликации контрольными точками в многомодульной вычислительной системе

Задача планирования репликации контрольными точками заключается в определении оптимальных моментов времени создания контрольных точек вычислительного процесса на каждом вычислительном модуле вычислительной системы для обеспечения ее отказоустойчивости при ограничениях на время завершения выполнения целевых задач.

В соответствии с [6], отказоустойчивость — способность системы, продукта или компонента работать, как предназначено, несмотря на наличие дефектов программного обеспечения или аппаратных средств.

В рассматриваемом контексте отказоустойчивость определяется количеством вычислительных модулей, отказ которых не приведет к срыву решения целевых задач за заданное время.

Дано: вычислительная система, состоящая из m ВМ, которая должна за время T выполнить множество задач (программ). Время, затрачиваемое программами на j -м ВМ, составляет θ_j , $\theta_j \leq T$. Из-

вестно, что на вычислительную систему влияют возмущающие факторы, которые обуславливают возможность отказа любого ВМ в момент времени t , распределенный по закону $F(t)$. Также известны затраты $c_i(t)$ времени на создание контрольной точки на j -м ВМ, требующей объема $v_j(t)$ памяти на момент времени t .

Найти: для каждого ВМ оптимальное количество контрольных точек и моменты времени их создания для обеспечения заданного уровня d отказоустойчивости вычислительной системы при ограничениях на объем $v^{\text{доп}}$ памяти каждого ВМ, доступной для хранения контрольных точек.

Модель вычислительного процесса с контрольными точками

Пусть на интервале времени $[0, T]$ решения целевых задач в моменты времени $w_1, w_2, \dots, w_n$ создано n контрольных точек (КТ), причем временные затраты на создание i -й контрольной точки, $1 \leq i \leq n$, составляют $c(w_i)$ (рис. 1).

При отсутствии КТ в случае отказа ВМ, для восстановления вычислений необходимо проводить их заново с нулевого момента времени. При наличии КТ вычисления можно восстанавливать с момента времени, соответствующего последней КТ.

Определим математическое ожидание φ_n величины сокращения времени на восстановление вычислений при использовании n контрольных точек:

$$\varphi_n = \sum_{j=1}^n w_j \left(1 - \alpha_j F_j(w_j + c(w_j)) \right), \quad (1)$$

где $\alpha_i = \prod_{j=1}^{i-1} \left(1 - F_j(w_j + c(w_j)) \right)$, $\alpha_1 = 1$;

$F_i(x)$ — функция распределения случайной величины x на интервале $x > w_{i-1}$.

Величина α_i есть вероятность того, что отказ ВМ не произошел на предыдущих $j = 1, 2, \dots, i-1$ интервалах между моментами времени создания КТ вычислительного процесса. Если вероятность возникновения отказа после момента времени создания последней КТ не зависит от вероятности этого события на предыдущих интервалах, то значение α_i следует полагать равным 1.

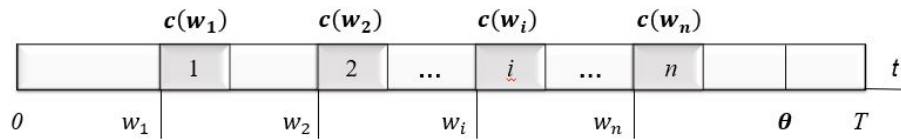


Рис. 1. Схема размещения контрольных точек

Для определения оптимальных моментов времени создания КТ найдем производные функции (1) по каждой переменной w_i , $i = \overline{1, n}$.

$$\frac{\partial \varphi_n}{\partial w_i} = 1 - \alpha_i \left(F_i(w_i + c(w_i)) + w_i f_i(w_i + c(w_i)) \right),$$

где $f_i(x)$ — плотность распределения случайной величины x на интервале $x > w_{i-1}$.

Тогда значения w_i можно найти, используя уравнение:

$$1 - \alpha_i \left(F_i(w_i + c(w_i)) + w_i f_i(w_i + c(w_i)) \right) = 0,$$

решением которого является

$$w_i = \frac{\frac{1}{\alpha_i} - F_i(w_i + c(w_i))}{f_i(w_i + c(w_i))}. \quad (2)$$

Используя это выражение, например, для равномерного распределения момента времени отказа ВМ, определим, что оптимальными моментами времени создания КТ являются значения:

$$\frac{1}{2}T, \frac{3}{4}T, \frac{7}{8}T, \dots, \frac{(2^i - 1)}{2^i}T, \dots$$

Для показательного распределения с параметром λ в условиях, когда вероятность возникновения отказа после момента времени создания последней КТ не зависит от его вероятности на предыдущих интервалах $\alpha_i = \text{const} = 1$, оптимальными моментами времени создания КТ являются значения $w_i = w_{i-1} + 1/\lambda$.

Решение уравнения (2) позволяет определить оптимальный момент времени для создания каждой контрольной точки для любого вида распределения момента времени отказа ВМ.

Так как функция (1) является неубывающей, то максимальное количество n^* КТ на j -м ВМ определяется максимальным значением n_j , удовлетворяющим ограничению

$$\sum_{i=1}^{n_j} c(w_i) \leq T - \theta_j, \quad \forall j \in [1, m]. \quad (3)$$

В случае, когда $c(w_i) = \text{const}$, значение n^* можно найти из выражения:

$$n^* = \left\lfloor \frac{T - \theta_j}{c} \right\rfloor, \quad \forall j \in [1, m],$$

где запись $\lfloor x \rfloor$ означает «ближайшее целое, меньшее или равное x ».

С другой стороны, целесообразность создания очередной i -й КТ обоснована, если выполняется неравенство:

$$w_i - w_{i-1} > c(w_i). \quad (4)$$

Среднее значение затрат времени $\bar{\theta}_j$ на выполнение вычислительного процесса на j -м ВМ с учетом возможности его восстановления с последней КТ составит:

$$\bar{\theta}_j = \theta_j + \sum_{i=1}^n \left(c(w_i) + \int_{w_i}^{w_{i+1}} (\tau - w_i) f_i(\tau) d\tau \right).$$

Таким образом, при моделировании вычислительного процесса с контрольными точками возможно оценивание уровня повышения его оперативности на основе выражения (1). Определение момента времени создания очередной КТ проводится в процессе реализации вычислительного процесса на основании выражения (2), а обоснованность создания очередной КТ формируется на основе выражений (3) и (4).

Модель вычислительного процесса с контрольными точками

в многомодульной вычислительной системе

Отказоустойчивость вычислительной системы будем оценивать количеством ВМ, отказ которых не приведет к тому, что цель функционирования

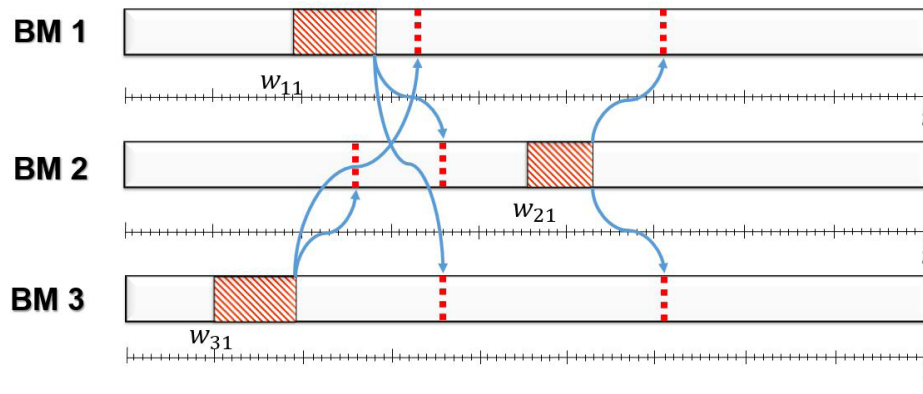


Рис. 2. Схема вычислительного процесса в вычислительной системе с репликацией контрольными точками

ВС не будет достигнута, то есть решение заданного количества задач не будет полностью завершено к директивному сроку.

Рассмотрим схему вычислительного процесса в отказоустойчивой вычислительной системе с межмашинным обменом контрольными точками (рис. 2).

Так как при отказе j -го ВМ выполняемый на нем вычислительный процесс может быть восстановлен с последней контрольной точки, размещенной на исправном ВМ, время завершения вычислений на последнем увеличивается на величину $\theta_j - w_{jk}$, где k — номер последней КТ, созданной на j -м ВМ и переданной на исправный ВМ.

Будем полагать, что контрольная точка, созданная на любом ВМ, передается на все остальные ВМ, что обеспечивает возможность завершить любой прерванный отказом ВМ на другом исправном ВМ с момента создания его последней КТ.

Возможность завершения всех вычислительных процессов при отказе некоторого количества μ ВМ из m , входящих в вычислительную систему, зависит от моментов времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\mu$ отказов ВМ, количества $m - \mu$ оставшихся исправными ВМ, резервов времени на исправных ВМ для завершения вычислительных процессов, прерванных на отказавших ВМ, моментом времени создания на каждом отказавшем ВМ последней перед отказом КТ и затратами времени на создание КТ.

После отказа очередного ВМ определяется исправный ВМ, на котором будет завершено выполнение прерванного отказом ВМ вычислительного процесса. Рациональным выбором является назначение для завершения вычислений такого ВМ, ре-

зерв времени вычислительного процесса которого максимален. Под резервом времени вычислительного процесса на j -м ВМ будем понимать величину $T - \theta_j - w_{j0}$, где T — директивный момент времени завершения вычислений, θ_j — потребные затраты времени на реализацию на j -м ВМ вычислительного процесса, w_{j0} — момент времени его начала.

Если завершение вычислительного процесса, выполняемого на отказавшем ВМ, возможно на одном из исправных ВМ за директивно назначенное время, то отказоустойчивость ВС составит 1. Подобным образом определяется d -устойчивость ВС как способность завершить все вычислительные процессы за установленный срок при отказе d любых ВМ. Так как отмеченный показатель является в общем случае случайной величиной, зависящей от момента времени отказов ВМ и количества отказавших ВМ, возможно построить функцию $\psi_m(d)$, определяющую вероятность m -модульной ВС обеспечить своевременное завершение всех вычислительных процессов при отказе любых d ($d < m$) ВМ.

Определим вектор $Y_{\langle m \rangle} = \langle \gamma_1, \dots, \gamma_m \rangle$ моментов времени отказа 1, 2, ..., m вычислительных модулей, до наступления которых ВС не сможет завершить все вычислительные процессы на оставшихся исправных ВМ, т. е. если одновременный отказ d вычислительных модулей произойдет в момент времени $\tau < \gamma_d$, то оставшиеся $m - d$ ВМ не смогут своевременно завершить все запланированные вычисления.

Значения элементов вектора $Y_{\langle m \rangle}$ зависят от размещения контрольных точек и резервов времени вычислительных процессов на каждом ВМ.

Тогда функция $\psi_m(d)$ может быть определена следующим образом:

$$\psi_m(d) = (1 - F(\gamma_d))\rho(d),$$

где $F(\tau)$ — функция распределения момента времени отказа ВМ, $\rho(d)$ — вероятность отказа ровно d ВМ.

Пример. Пусть момент времени отказа ВМ четырехмодульной ВС распределен равномерно на интервале $[0, T]$, плотность вероятности одновременного отказа d ВМ задана биномиальным распределением $C_4^d \cdot 0,15^d \cdot 0,85^{4-d}$, а вектор

$$Y_{\langle m \rangle} = \left\langle \frac{T}{12}, \frac{T}{10}, \frac{T}{8}, T \right\rangle.$$

Тогда функция $\psi_4(d)$ будет иметь значения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Пример функции $\psi_4(d)$

d	1	2	3	4
$\psi_4(d)$	0,3378	0,0878	0,0100	0,0000

Значение функции $\psi_m(d)$ при $d = m$ всегда нулевое, т. е. $\psi_m(m) = 0$, так как при отказе всех ВМ вычислительной системы завершить вычисления не представляется возможным.

Вычисление значений этой функции связано с планированием выполнения прерванных отказом ВМ вычислительных процессов на оставшиеся исправные ВМ.

Алгоритм имитационного моделирования функционирования многомодульной вычислительной системы с репликацией контрольными точками

Рассмотрим алгоритм имитационного моделирования функционирования многомодульной вычислительной системы с репликацией контрольными точками, с помощью которого исследовалась зависимость d -устойчивости ВС от вероятности одновременного отказа d ВМ на некотором интервале функционирования ВС, момент времени отказа на котором распределен равномерно.

Схема алгоритма имитационного моделирования изображена на рис. 3.

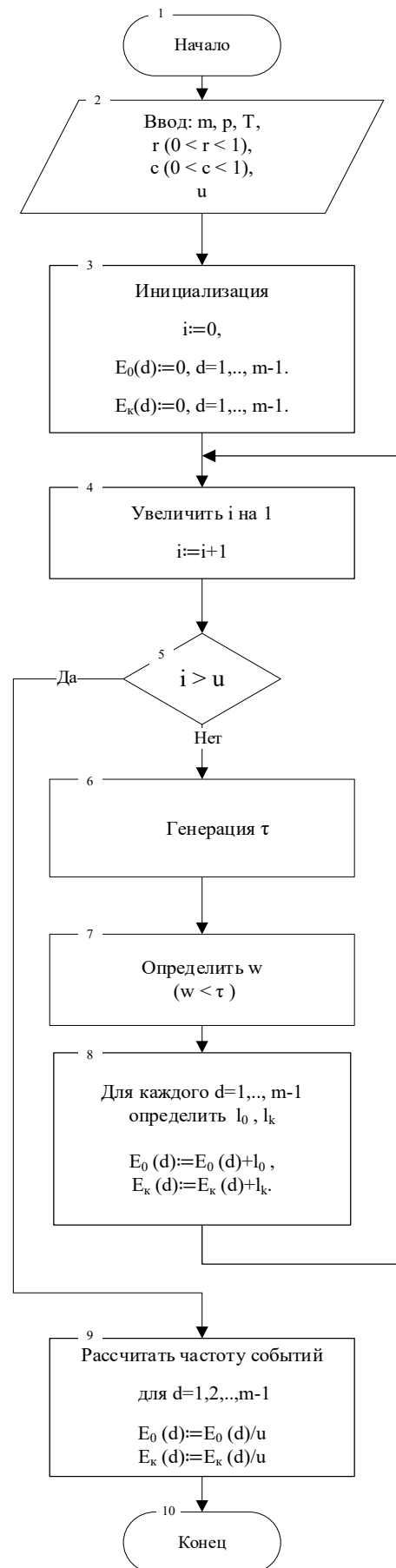


Рис. 3. Схема алгоритма имитационного моделирования

Таблица 2

Описание работы алгоритма имитационного моделирования

Шаг 1	Начало
Шаг 2	Ввод исходных данных: m — количество ВМ в ВС; p — вероятность события, приводящего к отказу ВМ; T — директивный срок завершения вычислений (правая граница интервала функционирования ВС); r — коэффициент резерва времени вычислений ($0 < r < 1$), определяющий долю времени от T , являющегося резервом вычислительного процесса (разница между директивным и реальным сроками завершения вычислительных процессов на каждом ВМ в штатном режиме); c — коэффициент затрат времени $0 < c < 1$, определяющий долю времени от $(1 - r) T$, которое тратится на создание контрольной точки; u — количество испытаний (прогонов) модели
Шаг 3	$i := 0, E(d) := 0, d = 1, \dots, m - 1$
Шаг 4	$i := i + 1$
Шаг 5	Если $i > u$, то переход на шаг 9
Шаг 6	Генерация момента времени τ возникновения события, приводящего к отказу ВМ
Шаг 7	Определение момента времени w создания последней ($w < \tau$) контрольной точки
Шаг 8	Для всех значений $d = 1, 2, \dots, m - 1$ определить возможность ($l_0 = 1$) или невозможность ($l_0 = 0$) завершить вычисления на оставшихся $m - d$ ВМ без создания КТ и соответствующие возможность ($l_k = 1$) или невозможность ($l_k = 0$) завершения вычислений с учетом создания КТ. Изменить значения массивов: $E_0(d) := E_0(d) + l_0, E_k(d) := E_k(d) + l_k$. Переход на шаг 4
Шаг 9	Рассчитать частоту событий, заключающихся в возможности завершения вычислений за директивное время для всех значений $d = 1, 2, \dots, m - 1$: $E_0(d) := \frac{E_0(d)}{u}, E_k(d) := \frac{E_k(d)}{u}, \forall d = 1, \dots, m - 1$
Шаг 10	Конец

Пошаговое описание работы алгоритма представлено в табл. 2.

В результате работы алгоритма массивы E_0 и E_k будут содержать вероятностные значения h показателя d -устойчивости, $\forall d = 1, \dots, m - 1$, для случаев неиспользования и использования КТ соответственно.

Показатель h показателя d -устойчивости ВС в результате работы приведенного алгоритма определяется как частота события, заключающегося в возможности завершения вычислений, начатых на всех ВМ, за установленное время при одновременном отказе d ВМ.

На рис. 3, а представлена зависимость вероятности h d -устойчивости восьмимодульной ВС от вероятности p события, приводящего к отказу ВМ, а на рис. 3, б — зависимость вероятности h d -устойчивости восьмимодульной ВС от резерва r времени вычислений.

Имитационное моделирование проводилось с учетом создания КТ. Фиксировались в первом случае резерв времени ($r = 0,2$), во втором — веро-

ятность отказа ВМ ($p = 0,5$). Кроме того, в обоих случаях предполагалось, что временные затраты на создание каждой КТ не превышают 1 % времени, отводимого на вычисления.

На рис. 4 представлены те же зависимости, но только для прироста вероятности показателя d -устойчивости ВС при создании КТ по сравнению с ситуацией, в которой КТ не создаются.

Представленные зависимости показывают, что преимущества использования предложенного подхода с применением контрольных точек достигает 30 %.

Заключение

Совершенствование способов применения военной и специальной техники на основе вычислительных систем военного назначения в современных условиях требует дальнейшего исследования и новых подходов к организации их функционирования в условиях внешних возмущающих факторов [7, 8].

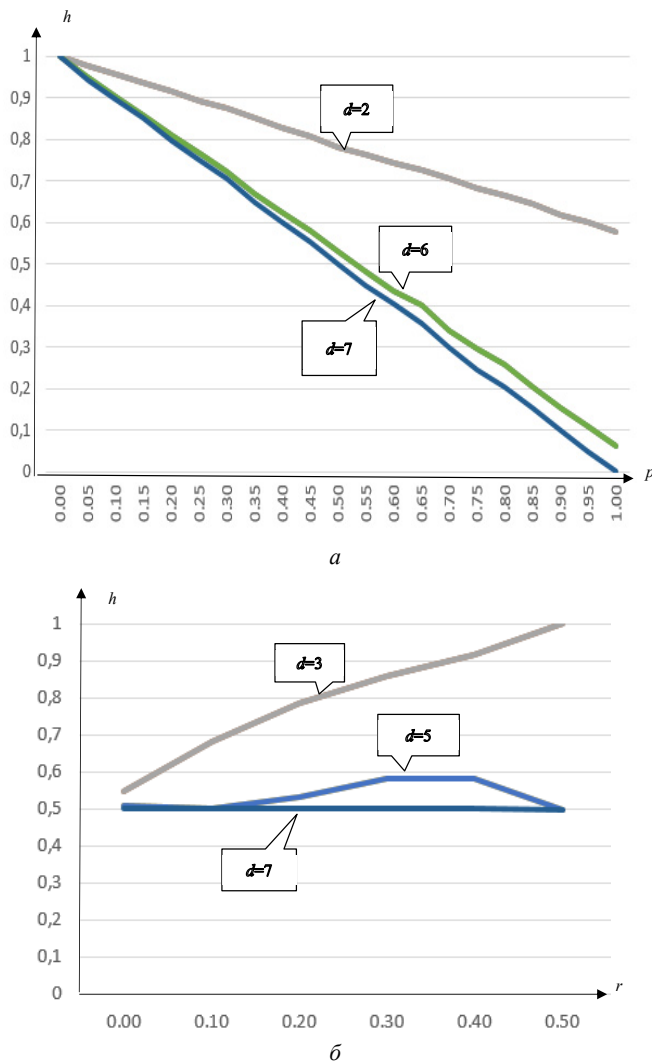


Рис. 3. Зависимости вероятности d -устойчивости вычислительной системы:
 a — от вероятности события, приводящего к отказу ВМ;
 b — от резерва времени вычислений

Жесткие требования по оперативности обработки целевой информации в режиме реального времени могут быть удовлетворены на основе метода «контрольных точек» с учетом структурной избыточности ВС и временной избыточности вычислительных процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бондаренко А. А., Яковлевский М. В. Обеспечение отказоустойчивости высокопроизводительных вычислений с помощью локальных контрольных точек // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2014. Т. 3, № 3. С. 20–36.
2. Поляков А. Ю., Данкина А. А. Оптимизация времени создания и объема контрольных точек восстановления параллельных программ // Вестник СибГУТИ. 2010. № 2 (10). С. 87–100.
3. A Survey of Rollback-Recovery Protocols in Message-Passing Systems / E. N. Elnozahy, L. Alvisi, Y.-M. Wang, D. B. Johnson // ACM Computing Surveys. 2002. Vol. 34, Iss. 3. Pp. 375–408. DOI: 10.1145/568522.568525.

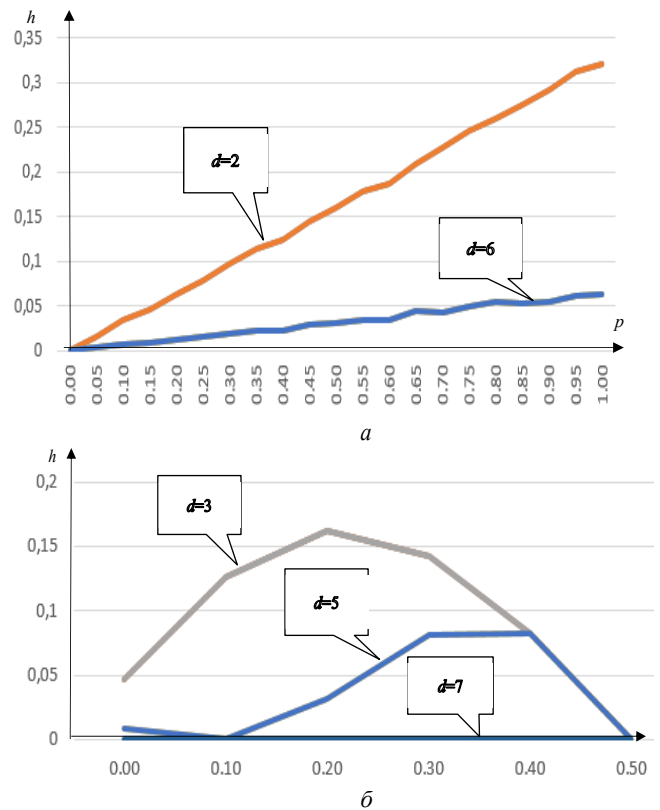


Рис. 4. Зависимости прироста d -устойчивости вычислительной системы:
 a — от вероятности события, приводящего к отказу ВМ;
 b — от резерва времени вычислений

Научная новизна представленной модели, в отличие от известных [9, 10], заключается в том, что она позволяет учитывать вид распределения момента времени отказов вычислительных модулей. Кроме того, хранение информации о КТ происходит на самих ВМ, а не на выделенном общем запоминающем устройстве.

Практическая значимость методики определяется возможностью ее применения для построения отказоустойчивых ВС, функционирующих в экстремальных ситуациях, что обеспечивает максимально возможную оперативность решения целевых задач.

4. Метод отказоустойчивой параллельной обработки информации в бортовых вычислительных системах летательных аппаратов на основе временной избыточности вычислительного процесса / А. Г. Басыров, С. С. Зыкова, И. Н. Кошель, В. В. Кузнецов // *Авиакосмическое приборостроение*. 2023. № 6. С. 33–39. DOI: 10.25791/aviakosmos.6.2023.1345.
5. Зыкова С. С. Модель и алгоритм планирования параллельной обработки информации в отказоустойчивой бортовой вычислительной системе на основе временной избыточности вычислительного процесса // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2023. № 4 (36). С. 28–33. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-436-28-33.
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010—2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов = Information technology. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2015 года № 464-ст: дата введения 2016-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. 36 с.
7. Rathore N. Checkpointing: Fault Tolerance Mechanism // *i-manager's Journal on Cloud Computing*. 2017. Vol. 4, No. 1. Pp. 28–35. DOI: 10.26634/jcc.4.1.13756.
8. Koren I., Mani Krishna C. *Fault-Tolerant Systems*. Second Edition. Cambridge (MA): Morgan Kaufmann Publishers, 2020. 416 p.
9. Elnozahy E. N., Plank J. S. Checkpointing for Peta-Scale Systems: A Look into the Future of Practical Rollback-Recovery // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2004. Vol. 1, Iss. 2. Pp. 97–108. DOI: 10.1109/TDSC.2004.15.
10. Optimal Checkpointing Period: Time vs. Energy / G. Aupy, A. Benoit, T. Hérault [et al.] // *High Performance Computing Systems. Performance Modeling, Benchmarking and Simulation (PMBS 2013): Revised Selected Papers of the 4th International Workshop (Denver, CO, USA, 18 November 2013)*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8551. Cham: Springer International Publishing, 2013. Pp. 203–214. DOI: 10.1007/978-3-319-10214-6_10.

Дата поступления: 20.05.2025

Решение о публикации: 21.05.25

Failure Management and Fault Tolerance Techniques in a Multi-Module Computing System Based on Creation and Replication of Checkpoints

Denis A. Kochurov — Adjunct of the Department of Information and Computing Systems and Networks. Research interests: fault-tolerant computing systems. E-mail: deniskochurov45@yandex.ru

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Kochurov D. A. Failure Management and Fault Tolerance Techniques in a Multi-Module Computing System Based on Creation and Replication of Checkpoints. *Intellectual Technologies on Transport* 2025, No. 2 (42), Pp. 103–112. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-103-111. (In Russian)

Abstract. Introduction: in order to enhance the efficiency of target information processing, it is necessary to adopt new approaches to the rapid detection and recovery from failures and faults to minimize the impact of such issues on the overall computing system. **Purpose:** to outline a technique for failure management and fault recovery in a multi-module computing system. This system implements periodic saving of calculations (checkpoints) and their exchange between all computing modules. **Results:** the problem of planning such a computing process has been outlined, including the determination of the optimal number and time points for creating checkpoints. The time points for creating

checkpoints are determined based on the law of distribution of time points of computing module failures. **Practical significance:** the results of the simulation modelling calculations conducted as part of the proposed approach demonstrate the feasibility of implementing the proposed technique.

Keywords: multi-module computing system, model of the computing process, checkpoint

REFERENCES

1. Bondarenko A. A., Iakobovski M. V. Obespechenie otkazoustoychivosti vysokoproizvoditelnykh vychisleniy s pomoshchyu lokalnykh kontrolnykh toчек [Fault Tolerance for HPC by Using Local Checkpoints], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Vychislitel'naya matematika i informatika" [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Software Engineering"]*, 2014, Vol. 3, No. 3, Pp. 20–36. (In Russian)
2. Polyakov A. Yu., Danekina A. A. Optimizatsiya vremeni sozdaniya i obema kontrolnykh toчек vosstanovleniya parallelnykh programm [Optimization of Size and Creation Time of Parallel Programs Checkpoints], *Vestnik SibGUTI [The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science]*, 2010, No. 2, Pp. 87–100. (In Russian)
3. Elnozahy E. N., Alvisi L., Wang Y.-M., Johnson D. B. A Survey of Rollback-Recovery Protocols in Message-Passing Systems, *ACM Computing Surveys*, 2002, Vol. 34, Iss. 3, Pp. 375–408. DOI: 10.1145/568522.568525.
4. Basyrov A. G., Zykova S. S., Koshel I. N., Kuznecov V. V. Metod otkazoustoychivoy parallelnoy obrabotki informatsii v bortovykh vychislitelnykh sistemakh letatelnykh apparatov na osnove vremennoy izbytochnosti vychislitelnogo protsessa [A Method of Fault-Tolerant Parallel Processing of Information in On-Board Computing Systems of Aircraft Based on the Temporary Redundancy of the Computing Process], *Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrument-Making]*, 2023, No. 6, Pp. 33–39. DOI: 10.25791/aviakosmos.6.2023.1345. (In Russian)
5. Zykova S. S. Model i algoritm planirovaniya parallelnoy obrabotki informatsii v otkazoustoychivoy bortovoy vychislitelnoy sisteme na osnove vremennoy izbytochnosti vychislitelnogo protsessa [A Model and Algorithm for Planning Parallel Information Processing in a Fault-Tolerant On-Board Computing System Based on the Time Redundancy of the Computing Process], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2023, No. 4 (36), Pp. 28–33. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-436-28-33. (In Russian)
6. GOST R ISO/MEK 25010—2015. Informatsionnye tekhnologii. Sistemnaya i programmnaya inzheneriya. Trebovaniya i otsenka kachestva sistem i programmnogo obespecheniya (SQuaRE). Modeli kachestva sistem i programmnnykh produktov [GOST R ISO/MEK 25010—2015. Information technology. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models]. Effective from June 01, 2016. Moscow, StandartInform Publishing House, 2015, 36 p. (In Russian)
7. Rathore N. Checkpointing: Fault Tolerance Mechanism, *i-manager's Journal on Cloud Computing*, 2017, Vol. 4, No. 1, Pp. 28–35. DOI: 10.26634/jcc.4.1.13756.
8. Koren I., Mani Krishna C. Fault-Tolerant Systems. Second Edition. Cambridge (MA), Morgan Kaufmann Publishers, 2020, 416 p.
9. Elnozahy E. N., Plank J. S. Checkpointing for Peta-Scale Systems: A Look into the Future of Practical Rollback-Recovery, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2004, Vol. 1, Iss. 2, Pp. 97–108. DOI: 10.1109/TDSC.2004.15.
10. Aupy G., Benoit A., Hérault T., et al. Optimal Checkpointing Period: Time vs. Energy, *High Performance Computing Systems. Performance Modeling, Benchmarking and Simulation (PMBS 2013): Revised Selected Papers of the 4th International Workshop, Denver, CO, USA, November 18, 2013. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8551. Cham, Springer International Publishing, 2013, Pp. 203–214. DOI: 10.1007/978-3-319-10214-6_10.

Received: 20.05.2025

Accepted: 21.05.2025