



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 11 Декабрь 2025 № 4



Журнал «Автоматика на транспорте» (г. Санкт-Петербург) основан в 2014 году.

Издание предназначено для полного освещения научных и практических достижений в области автоматического и автоматизированного управления на транспорте.

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

База данных	Ссылка	QR-код
	https://cyberleninka.ru/journal/n/avtomatika-na-transporte?i=1057282	
	https://www.elibrary.ru/title_about.asp?id=54938	
	https://e.lanbook.com/journal/2566	
Сайт журнала	http://www.atjournal.ru/	

Подписано в печать 27.11.2025. Выход в свет 17.12.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 11. Тираж 200 экз. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «БУКИ ВЕДИ»
г. Москва, Партийный пер., 1, корп. 58, стр. 3

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александр Никитин	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, главный редактор журнала «Автоматика на транспорте», Санкт-Петербург, Россия
Константин Бочков	д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Белоруссия
Марек Мезитис	д-р наук, доцент, Рижский технический университет, Рига, Латвия
Раймунд Убар	д-р техн. наук, академик Эстонской академии наук, Таллинский технический университет, Таллин, Эстония
Владимир Хаханов	д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
Фуниан Ху	д-р наук, профессор, Школа электротехники педагогического университета Цзянсу, Сюйчжоу, Китай
Христо Христов	д-р техн. наук, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Наседкин Олег Андреевич	канд. техн. наук, доцент, заместитель главного редактора журнала «Автоматика на транспорте», ПГУПС, Санкт-Петербург
Кушпиль Игорь Васильевич	канд. техн. наук, научный редактор журнала «Автоматика на транспорте», ПГУПС, Санкт-Петербург
Баранов Леонид Аврамович	д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва
Безродный Борис Федорович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Бубнов Владимир Петрович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Бушуев Сергей Валентинович	канд. техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург
Грачев Владимир Васильевич	д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Долгий Игорь Давидович	д-р техн. наук, профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону
Ефанов Дмитрий Викторович	д-р техн. наук, профессор, СПбПУ, Санкт-Петербург
Малыгин Игорь Геннадьевич	д-р техн. наук, профессор, ИПТ РАН, Санкт-Петербург
Марков Дмитрий Спиридонович	канд. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Никищенков Сергей Алексеевич	д-р техн. наук, профессор, СамГУПС, Самара
Розенберг Ефим Наумович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Ходаковский Валентин Аветикович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Хомоненко Анатолий Дмитриевич	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Alexander Nikitin	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Editor-in-chief of "Transport automation research", St. Petersburg, Russia
Konstantin Bochkov	D. Sc., Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus
Marek Mezitis	Ph. D., Associate Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia
Raimund Ubar	D. Sc., Member of Estonian Academy of Sciences, Tallinn Technical University, Tallinn, Estonia
Vladimir Hahanov	D. Sc., Professor, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
Funian Hu	Ph. D., Professor, School of Electrical Engineering of Jiangsu Normal University, Xuzhou City, China
Khristo Khristov	D. Sc., Professor, Technical University, Sofia, Bulgaria

EDITORIAL BOARD

Oleg A. Nasedkin	Ph. D., Associate Professor, deputy editor-in-chief of "Transport automation research", Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Igor V. Kushpil	Ph. D., science editor of "Transport automation research", Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Leonid A. Baranov	D. Sc., Professor, Russian University of Transport, Moscow
Boris F. Bezrodnyy	D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Automation and Communication, Moscow
Vladimir P. Bubnov	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Sergey V. Bushuev	Ph. D., Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg
Vladimir V. Grachev	D. Sc., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Igor D. Dolgiy	D. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don
Dmitry V. Efanov	D. Sc., Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
Igor G. Malygin	D. Sc., Professor, Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg
Dmitry S. Markov	Ph. D., Associate professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Sergey A. Nikischenkov	D. Sc., Professor, Samara State Transport University, Samara
Efim N. Rozenberg	D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Automation and Communication, Moscow
Valentin A. Khodakovsky	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Anatoliy D. Khomonenko	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
Учредитель	ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»	<i>Соловьев А. Д., Манаков А. Д.</i> Анализ воздействия атмосферных перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики287
Издатель	<i>Долгий А. И., Розенберг Е. Н., Ольшанский А. М., Озеров А. В.</i> О выборе рациональной стратегии восстановления полигонных автоматизированных систем управления.....303
ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024	<i>Кулагин М. А., Янченко Г. О., Родина Д. М., Полегенько А. И.</i> Помехозащищенность интеллектуальных транспортных систем технического зрения для анализа изображений железнодорожной инфраструктуры.....313
Главный редактор	ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС	<i>Кокурин И. М., Пушкин И. А.</i> Тяговые расчеты с учетом установки и перестановки границ устройств.....327
Редакция журнала	МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ
Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — И. Л. Лютомская Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	<i>Мудрая Н. Г., Марюхненко В. С.</i> Автомат для рельсовых цепей: адаптивный контроль и цифровая обработка на основе широкополосных сигналов332
Адрес учредителя и редакции	<i>Муконина М. И.</i> Предиктивное моделирование уровня воды в равнинных реках для повышения безопасности объектов транспортной инфраструктуры.....342
190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Телефон: +7(812)457-85-79 E-mail: ait.automatika@yandex.ru Сайт: www.atjournal.ru	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ
Адрес издателя	<i>Ефанов Д. В., Елина Е. И., Нкунгу Т. М., Лесковец И. В., Гебель Е. С.</i> Метод синтеза быстродействующих тестеров композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам парами комбинаций на основе симметричных булевых функций355
Свидетельство о регистрации средства массовой информации	
ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015, выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий 18 декабря 2017 года ISSN 2412-9186	
Индекс подписки Агентство «Урал-пресс» 33316	
© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025	

Scientific and technical journal "Transport automation research"	CONTENTS
FOUNDER	VIABILITY, RELIABILITY, SAFETY
Federal Railway Transport Agency Federal State Budget Educational Institution for Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University" "Automation and Remote Control on Railways" department	<i>Solovyov A. D., Manakov A. D.</i> Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltage on Railway Automation and Remote Control Devices.....287
PUBLISHER	<i>Dolgiy A. I., Rozenberg E. N., Olshanskiy A. M., Ozerov A. V.</i> Rational Strategy for the Rehabilitation of Polygonal Automated Control Systems303
"Publishing Center "RIOR", LLC № 78751, 28.12.2024	<i>Kulagin M. A., Yanchenko G. O., Rodina D. M., Polegenko A. I.</i> Robustness of Intelligent Transport Systems Employing Computer Vision for the Analysis of Railway Infrastructure Images.....313
EDITOR-IN-CHIEF	OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS
Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor	<i>Kokurin J. M., Pushkin I. A.</i> Tractive Effort Calculations with Consideration for the Arrangement and Rearrangement of Block Section Boundaries.....327
JOURNAL STAFF	MONITORING METHODS IN TRANSPORT
Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Irina L. Liutomskaia. Editing and proofreading: Nadezhda V. Yudina Layout: Irina G. Ivanshina	<i>Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S.</i> Railway Circuit Controller: Adaptive Control and Digital Processing Based on Broadband Signals332
FOUNDER'S AND EDITORIAL OFFICE ADDRESS	<i>Mukonina M. I.</i> Predictive Modelling of Water Levels in Lowland Rivers to Enhance the Safety of Transport Infrastructure342
190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, "Automation and Remote control on Railways" department +7(812) 457-85-79 ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS
PUBLISHER'S ADDRESS	<i>Efanov D. V., Yelina Ye. I., Ncungo T. M., Leskovets I. V., Gebel E. S.</i> Design Method of High-Speed Checkers for Two Constant-Weight Codes with Orthogonal Combinations Across All Bits Using the Symmetric Boolean Functions355
127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	
MASS MEDIA REGISTRATION CERTIFICATE NUMBER	
PI № FS77-61375 dd. 10.04.2015 issued by the Federal service for the monitoring of communications, information technologies and mass communications The Journal is included in the Bulletin of leading peer-reviewed scientific journals and publications (18 December, 2017) ISSN 2412-9186	
Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33316	
© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2025	

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

СОЛОВЬЕВ Александр Дмитриевич, аспирант; e-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

МАНАКОВ Александр Демьянович, д-р техн. наук, профессор кафедры; e-mail: manakoff_2@mail.ru

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

В данной статье приведены результаты анализа грозовой активности в пределах Октябрьской железной дороги по дистанциям сигнализации, централизации и блокировки и по дистанциям инфраструктуры за период с 2014 по 2024 г., распределения отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, поврежденных средств защиты от атмосферных перенапряжений. По результатам анализа определены дистанции, в которых наиболее неблагоприятная ситуация в области защиты от атмосферных перенапряжений, выяснены причины, почему складывается данная ситуация. Выполнен анализ распределения отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики по системам с детализацией по месяцам грозового периода, анализ распределения поврежденных приборов и средств защиты по типам аппаратуры и по характеру неисправности, установлены наиболее подверженные повреждению приборы железнодорожной автоматики и телемеханики. Для более детального и объективного анализа предложено использовать дополнительные показатели: показатель относительной опасности грозы и показатель относительной опасности отказа.

Ключевые слова: атмосферные перенапряжения; железнодорожная автоматика и телемеханика; средства грозозащиты; отказы устройств автоматики.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302

▼ Введение

Проблема повреждения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) от воздействия атмосферных перенапряжений (ПН) существует с начала применения электронного оборудования в составе систем [1]. Вследствие воздействия атмосферных ПН устройства ЖАТ могут выйти из строя, что способно привести к переходу устройств в опасное состояние¹.

Проблемой воздействия ПН на устройства ЖАТ в разное время занимались И. Г. Евсеев, А. М. Костроминов, А. А. Костроминов, В. И. Шамапов, Ю. А. Кравцов и другие ученые [3–7].

¹ Опасное состояние — неработоспособное состояние устройств, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации [2].

В данный момент на сети железных дорог Российской Федерации проблему воздействия атмосферных ПН на устройства ЖАТ решают применением устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) в соответствии с методическими указаниями ОАО «РЖД»².

За рубежом существует несколько подходов к защите устройств ЖАТ от воздействия атмосферных ПН.

Например, на железных дорогах США придерживаются идеи многоуровневой защиты [8]. В Польше широкое применение получил метод активной молниезащиты [9]. На железных дорогах Японии для защиты высоковольтных линий от атмосферных ПН применяют ограничители

² Методические указания по применению устройств защиты от перенапряжений в устройствах ЖАТ. Утвержден и введен в действие Управлением автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» от 30 марта 2021 г. № ЦДИ-1225.

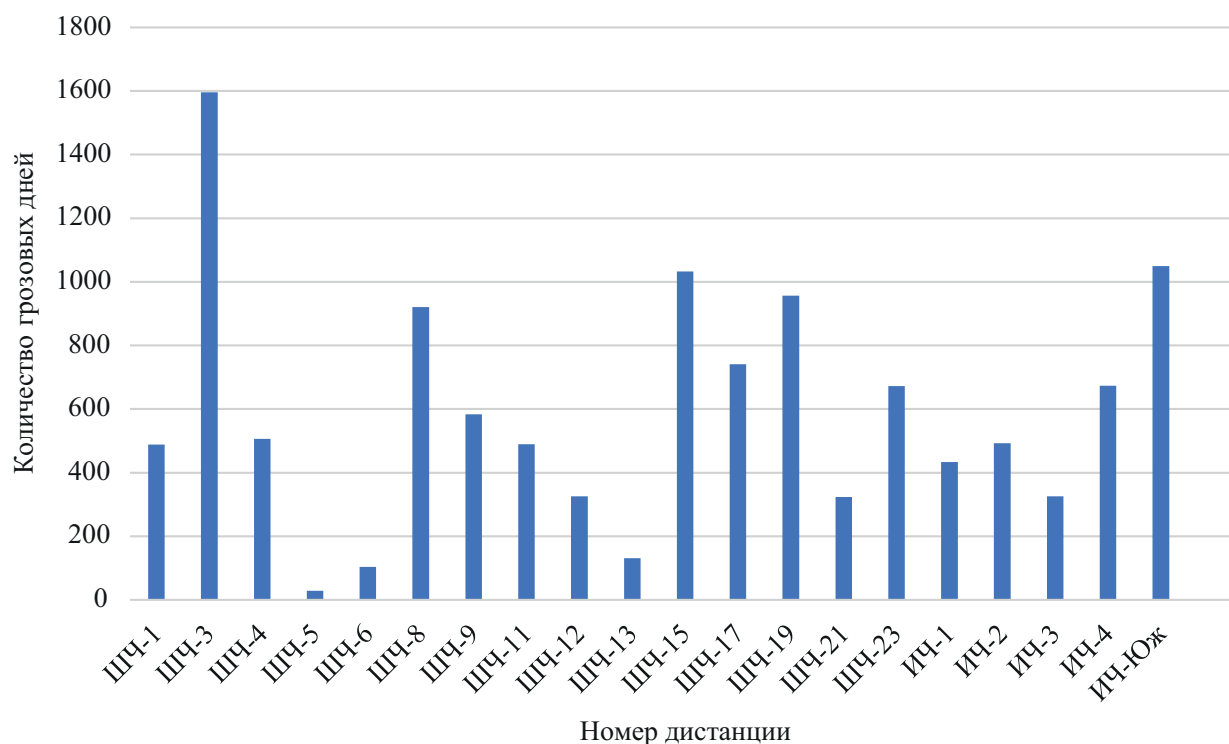


Рис. 1. Распределение грозных дней по ШЧ и ИЧ

напряжения нелинейные совместно с грозо-защитным тросом [10]. В большинстве стран мира с проблемой воздействия атмосферных ПН борются установкой УЗИП в соответствии с требованиями зонной концепции³.

Цель статьи — анализ воздействия атмосферных ПН на устройства ЖАТ в границах Октябрьской железной дороги для определения оценки эффективности применяемых в данный момент средств молниезащиты.

Для достижения цели статьи необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ отказов устройств ЖАТ от воздействия атмосферных ПН;
- произвести анализ поврежденных приборов ЖАТ от воздействия атмосферных ПН;
- определить наиболее опасный канал проникновения волн атмосферных ПН;
- осуществить анализ распределения поврежденных приборов от воздействия атмосферных ПН по типам аппаратуры;
- исследовать повреждения средств защиты от воздействия атмосферных ПН.

1. Анализ отказов устройств ЖАТ от воздействия атмосферных ПН

На сети железных дорог Российской Федерации грозовой период приходится в основном на весенние и летние месяцы. Например, грозовой период в пределах Октябрьской железной дороги приходится на период с мая по сентябрь.

Анализ ограничен временным периодом с 2014 по 2024 г., информация взята из ежегодных отчетов службы автоматики и телемеханики по подготовке к грозовому периоду.

На всем полигоне Октябрьской железной дороги было зафиксировано 12 260 грозных дней, в результате которых произошло 1347 отказов, по причине которых были повреждены 1100 приборов и 827 средств защиты.

На рис. 1 показано распределение количества грозных дней по дистанциям сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ) и по дистанциям инфраструктуры (ИЧ) в период с 2014 по 2024 г. В анализе будут присутствовать только эксплуатационные ШЧ, то есть анализ будет производиться без учета ремонтных ШЧ.

Среднее количество грозных дней по ИЧ и ШЧ равняется 533. Из рис. 1 видно, что наибольшее количество грозных дней

³ IEC 62305: 2010 "Protection against lightning". — Part 1–4.

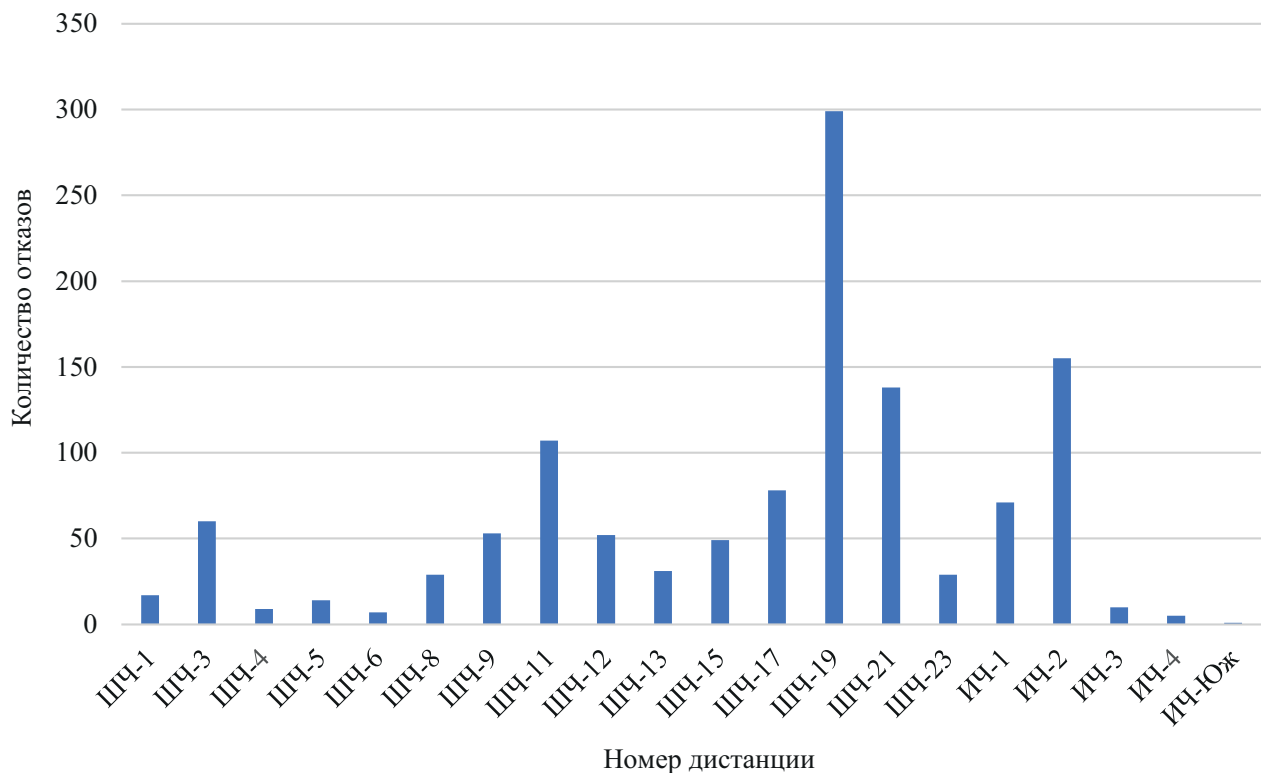


Рис. 2. Распределение отказов устройств ЖАТ по ШЧ и ИЧ

зафиксировано в ШЧ-3, а именно 1596 грозовых дней. В ИЧ-Юж. зафиксировано 1049 грозовых дней, но стоит отметить, что ИЧ-Юж. была образована путем объединения ИЧ-3 и ИЧ-4 в 2019 г., исходя из этого целесообразнее рассматривать данные дистанции совместно. Соответственно, в границах данных ИЧ зафиксировано 2048 грозовых дней, ШЧ-15 — 1033 грозовых дня, в ШЧ-19 — 957 грозовых дней, ШЧ-8 — 920 грозовых дней, ШЧ-17 — 742 грозовых дня, ШЧ-23 — 672 грозовых дня. Стоит отметить, что 67 % грозовых дней приходится на дистанции, описанные выше. В ШЧ-5, ШЧ-6, ШЧ-13 грозовая активность минимальная.

Высокое количество грозовых дней на участке ШЧ-3 обусловлено расположением полигона дистанции в зоне с плотной сетью водоемов — озер и рек, прилегающих к железнодорожной инфраструктуре.

Вблизи водоемов возрастает вероятность формирования грозовых облаков с повышенной электрической заряженностью [11]. Это связано с тем, что над водной поверхностью интенсифицируется процесс конденсации и конвекции, способствующий быстрому накоплению зарядов в облаках.

Кроме того, грозовое облако, несущее электрический заряд, над водоемами значительно быстрее индуцирует заряд противоположного знака на земной поверхности под собой. Это приводит к:

- резкому увеличению напряженности электрического поля в приземном слое;
- повышению вероятности грозовых разрядов непосредственно в районе водоемов [12].

Как следствие, возрастает риск опасного электромагнитного воздействия грозовых разрядов на устройства ЖАТ, размещенные в прибрежной зоне [13].

Например, вблизи станции Медведево находятся озера Бологое, Глубочиха, Славинское, Осовец, Колоmineц, Великое, Долгое, Видимля, а также протекают реки Нефтянка и Коломенка. Рядом со станцией Валдай находятся озера Валдайское, Ельчинское, Середейское, Глуботцы, Острычино, Чернушка, а также протекает река Вязовка и ручей Архирейский.

В дистанциях ШЧ-19, ШЧ-15, ШЧ-17 и ШЧ-8 наблюдается ситуация, аналогичная ШЧ-3.

Высокое количество грозовых дней на дистанции ИЧ-Юж. объясняется двумя ключевыми факторами:

1. Наибольшей протяженностью участка — 1500 км.

2. Размещением обслуживаемых участков в различных регионах, отличающихся по климатическим и ландшафтным условиям⁴.

На рис. 2 показано распределение отказов устройств ЖАТ от воздействия атмосферных ПН по ШЧ и ИЧ.

Среднее количество отказов по дистанциям равно 59 отказам. Наибольшее количество отказов зафиксировано в ШЧ-19 — 299 отказов. В дистанции инфраструктуры ИЧ-2 зафиксировано 155 отказов, в ШЧ-21 — 138 отказов, в ШЧ-11 — 107 отказов.

Из рис. 2 видно, что отказы распределяются неравномерно, 61 % отказов приходится на дистанции: ШЧ-11, ШЧ-19, ШЧ-21, ИЧ-2.

Как видно из рис. 2, дистанция ШЧ-19 характеризуется наиболее высоким уровнем отказов устройств ЖАТ, вызванных воздействием атмосферных перенапряжений (ПН).

Основная причина заключается в высокой плотности водоемов на всем полигоне ШЧ-19. При этом, в отличие от дистанции ШЧ-3 (лидера по количеству грозových дней в наблюдаемый период), ШЧ-19 расположена в Республике Карелии, где преобладает равнинная и болотистая местность. В таких условиях устройства ЖАТ становятся приоритетными объектами поражения при воздействии атмосферных ПН.

Существенное влияние оказывает также удельное сопротивление грунта:

- в пределах ШЧ-19 преобладают каменисто-щебнистый грунт и песчаный субстрат;
- в ШЧ-3 доминирует торфяно-подзолистый грунт.

При этом удельное сопротивление каменисто-щебнистого грунта в среднем в 100 раз превышает показатель для торфяно-подзолистого грунта⁵.

Высокое удельное сопротивление грунта способствует растеканию тока грозового разряда

по оболочкам кабелей, рельсам и иным токопроводящим элементам инфраструктуры. Это приводит к возникновению перенапряжений в устройствах ЖАТ.

В связи с указанной особенностью на полигоне ШЧ-19 затруднено обеспечение требуемого сопротивления заземляющих устройств ЖАТ. Согласно нормативным требованиям, оно должно составлять:

- не более 10 Ом — на участках с электротягой переменного тока;
- не более 4 Ом — на участках с электротягой постоянного тока⁶.

Далее приведены станции и перегоны в пределах ШЧ-19, где произошло наибольшее количество отказов, и водоемы, находящиеся в непосредственной близости к ним.

Вблизи станции Костомукша-Товарная расположены крупные озера: Подкова, Конток-кярви, Сапожок, Травяное, Костомукшское, а также свыше 50 мелких озер. Вдоль станции протекает река Контокки.

Рядом со станцией Тунгуда находятся крупные озера Космозеро и Ширчалампи, несколько мелких озер и река Тунгуда.

Недалеко от станции Кемь располагается крупный водоем — Кемская губа, а также протекает река Кемь.

Около станции Петрозеро расположены крупные озера: Пертьярви, Тайбелен-Тагазет, Микитинъярви. В этой местности протекают реки Тунгуда и Малдынадеги.

Параллельно перегону Шижня — Сухое протекает река Шижня. Вблизи находятся Золотецкое водохранилище и Сорокская губа.

Вдоль перегона Чупа — Лоухи проходит пролив Долгая Салма. В окрестностях расположены озера Ивановское, Второе Ивановское, Островское и протекает река Мельничная.

Близ перегона Кочкома — Идель находятся Палокоргское водохранилище и Беломорско-Балтийский канал, а также протекает река Идель.

⁴ Положение об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений. Утверждено Распоряжением ОАО «РЖД» от 29 ноября 2019 г. № 2675/р.

⁵ ГОСТ 25100—2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. Введен в действие Приказом Росстандарта от 21 июля 2020 г. № 384-ст.

⁶ ГОСТ Р 58232—2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Объекты железнодорожной инфраструктуры. Комплексная защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 октября 2018 г. № 722-ст.

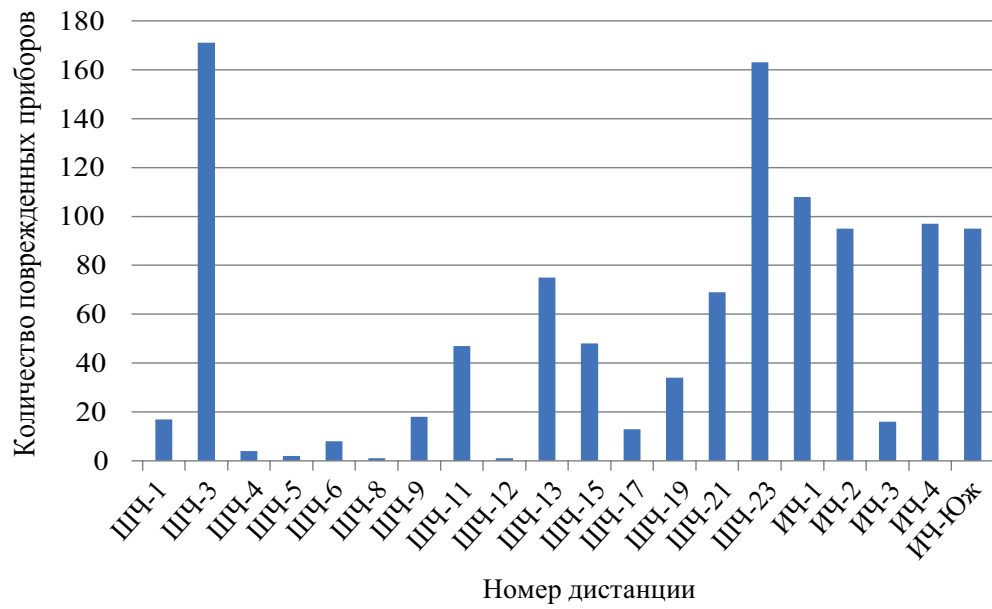


Рис. 3. Распределение поврежденных приборов по ШЧ и ИЧ

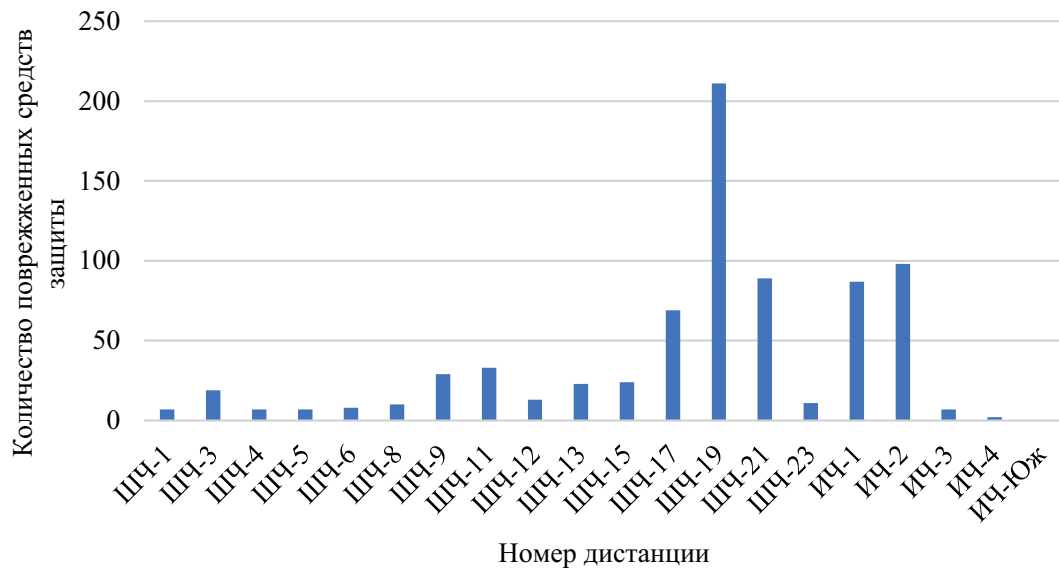


Рис. 4. Распределение поврежденных средств защиты по ШЧ и ИЧ

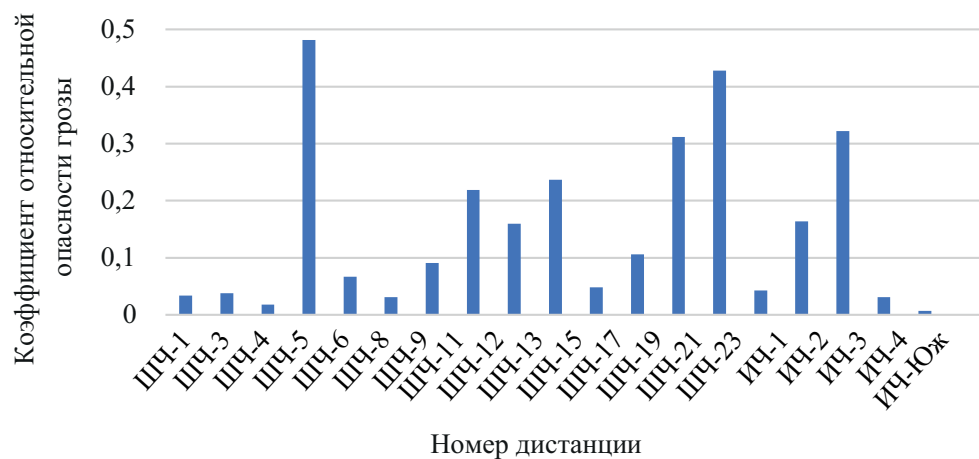


Рис. 5. Распределение показателя относительной опасности грозы по ШЧ и ИЧ

На рис. 3 представлено распределение поврежденных приборов (в результате воздействия атмосферных перенапряжений, ПН) по дистанциям ШЧ и ИЧ за период 2014–2024 гг.

Среднее количество поврежденных приборов по ШЧ и ИЧ равняется 48.

Из рис. 3 видно, что наибольшее количество поврежденных приборов приходится на ШЧ-3 — 171 прибор, в том числе ШЧ-19 — 163 прибора, ИЧ-1 — 97 приборов, ИЧ-2 — 95 приборов, ШЧ-21 — 95 приборов, ШЧ-11 — 75 приборов, ШЧ-17 — 69 приборов. На дистанции, описанные выше, приходится 72 % из общего числа поврежденных приборов. В ШЧ-4, ШЧ-5, ШЧ-23, ШЧ-6, ИЧ-Юж. зафиксировано наименьшее количество поврежденных приборов.

На рис. 4 показано распределение поврежденных средств защиты от действия атмосферных ПН по ШЧ и ИЧ в период с 2014 по 2024 г.

Среднее количество поврежденных средств защиты по ШЧ и ИЧ равняется 36 шт. Также стоит отметить, что распределение происходит неравномерно и на ШЧ-19, ИЧ-2, ШЧ-21, ИЧ-1, и ШЧ-17 приходится 65 % от всех отказавших средств защиты.

Из рис. 4 видно, что наибольшее количество поврежденных средств защиты приходится на ШЧ-19 — 211 шт., ИЧ-2 — 98 поврежденных средств защиты, ШЧ-21 — 89, ИЧ-1 — 87, ШЧ-17 — 69. В остальных дистанциях количество поврежденных средств защиты незначительно.

Из приведенного выше анализа видно, что в различных анализируемых факторах в пределах одной и той же дистанции показатели значительно отличаются. Например, ШЧ-3 по уровню грозовой активности находится в лидерах, а количество отказов в данной дистанции незначительно. Поэтому для анализа эффективности мероприятий, проводимых на дистанциях по защите устройств ЖАТ от атмосферных ПН, в работе введены два дополнительных показателя:

- коэффициент относительной опасности грозы — $K_{ог}$;
- коэффициент относительной опасности отказа — $C_{оо}$.

Коэффициент $K_{ог}$ — показывает количество отказов устройств ЖАТ, вызванных

воздействием атмосферных ПН, произошедших за один грозовой день. Коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_{ог} = \frac{N_{отк}}{M_{гд}}, \quad (1)$$

где $K_{ог}$ — показатель относительной опасности грозы;

$N_{отк}$ — количество отказов устройств, вызванных действием атмосферных ПН;

$M_{гд}$ — количество грозовых дней за исследуемый период.

Коэффициент $C_{оо}$ показывает количество поврежденных приборов при одном отказе, вызванном действием атмосферных ПН. Значение коэффициента рассчитывается по формуле:

$$C_{оо} = \frac{L_{пр}}{N_{отк}}, \quad (2)$$

где $C_{оо}$ — коэффициент относительной опасности отказа;

$L_{пр}$ — количество поврежденных приборов.

Распределение коэффициента относительной опасности грозы по ШЧ и ИЧ в период с 2014 по 2024 г. показано на рис. 5.

Среднее значение показателя относительной опасности грозы по дистанциям ШЧ и ИЧ равняется 0,109, то есть на 10 грозовых дней приходится в среднем один отказ. Наибольшее значение показателя относительной опасности грозы зафиксировано в ШЧ-5 — 0,482. Это обусловлено тем, что в границах ШЧ-5 зафиксировано малое количество грозовых дней и малое количество отказов. Грозовая активность в пределах ШЧ-5 является случайным и редким событием, но практически каждый второй грозовой день приводит к отказу. В ШЧ-21 значение показателя — 0,428, в ИЧ-2 — 0,322, в ШЧ-19 — 0,311.

Сравним результаты анализа относительной опасности грозы с результатами анализа отказов устройств ЖАТ. Показатели «относительной опасности грозы» ШЧ-1, ШЧ-4, ШЧ-8, ШЧ-9, ШЧ-11, ШЧ-12, ШЧ-15, ШЧ-23, ИЧ-1, ИЧ-2, ИЧ-Юж. в процентном соотношении практически не изменились по отношению к показателю «отказ устройств».

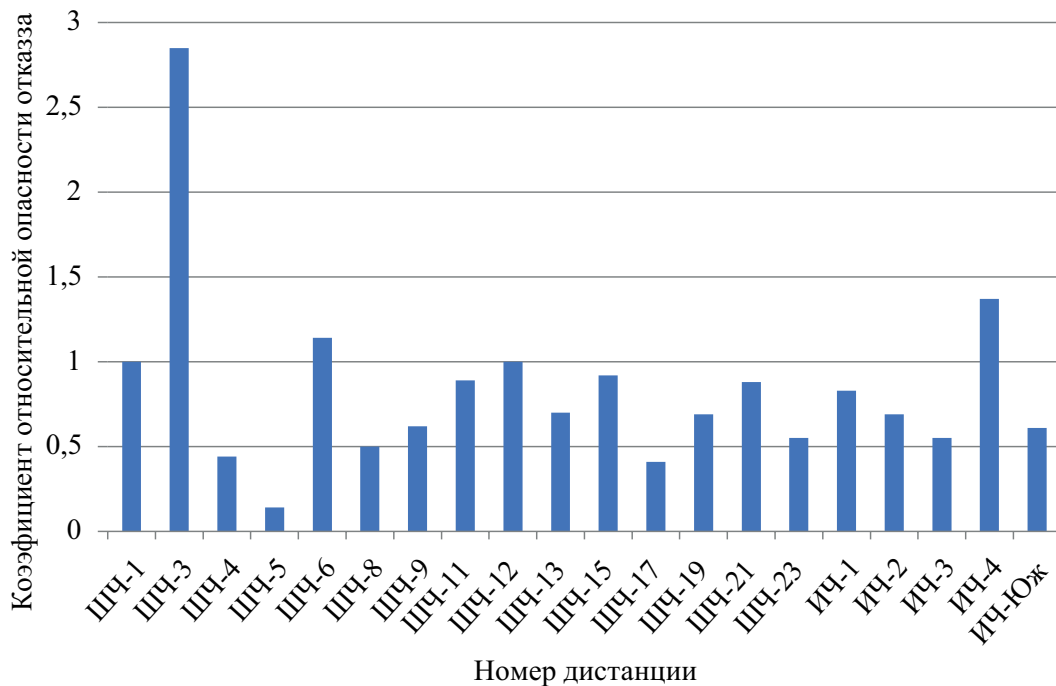


Рис. 6. Распределение показателя относительной опасности отказа по ШЧ и ИЧ

Показатели «относительной опасности грозы» ШЧ-3, ШЧ-17 в процентном соотношении уменьшились по отношению к показателю «отказ устройств». Показатели «относительной опасности грозы» ШЧ-21, ШЧ-13 в процентном соотношении значительно увеличились по отношению к показателю «отказ устройств». Это говорит о том, что в границах данных дистанций опасность грозы максимальна для устройств ЖАТ.

Распределение показателя относительной опасности отказа в границах Октябрьской железной дороги в период с 2014 по 2024 г. показано на рис. 6.

Среднее значение показателя относительной опасности отказа по ШЧ и ИЧ — 0,82. Наибольшее значение показателя «относительная опасность отказа» наблюдается в ШЧ-3 — 2,85. Наименьшее значение показателя «относительная опасность грозы» наблюдается в ШЧ-5 — 0,14. По остальным дистанциям показатель «относительная опасность отказа» распределяется равномерно.

Из анализа рис. 5 и 6 следует, что в ШЧ-3 наблюдается низкая относительная опасность грозы и высокая относительная опасность отказа. То есть в границах данной дистанции

грозы редко приводят к отказам, но отказы приводят к значительному повреждению приборов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что средства защиты в границах данной дистанции работают неэффективно, так как их основной задачей является защита приборов. В ШЧ-5 ситуация противоположная, в дистанции наблюдается высокая относительная опасность грозы и низкая относительная опасность отказа. То есть в границах ШЧ-5 грозы часто приводят к отказам, но отказы практически не приводят к значительному повреждению приборов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что средства защиты в данной дистанции работают эффективно.

Как известно, отказы устройств ЖАТ, вызванные действием атмосферных ПН, происходят по четырем основным каналам [14]:

- по вводам питания;
- по рельсовым цепям;
- по линейным цепям;
- по цепям кабельных систем напольных устройств.

Из общего числа отказов устройств ЖАТ, вызванных действием атмосферных ПН в границах Октябрьской железной дороги в период с 2014 по 2024 г., 60 % пришлось на отказы по

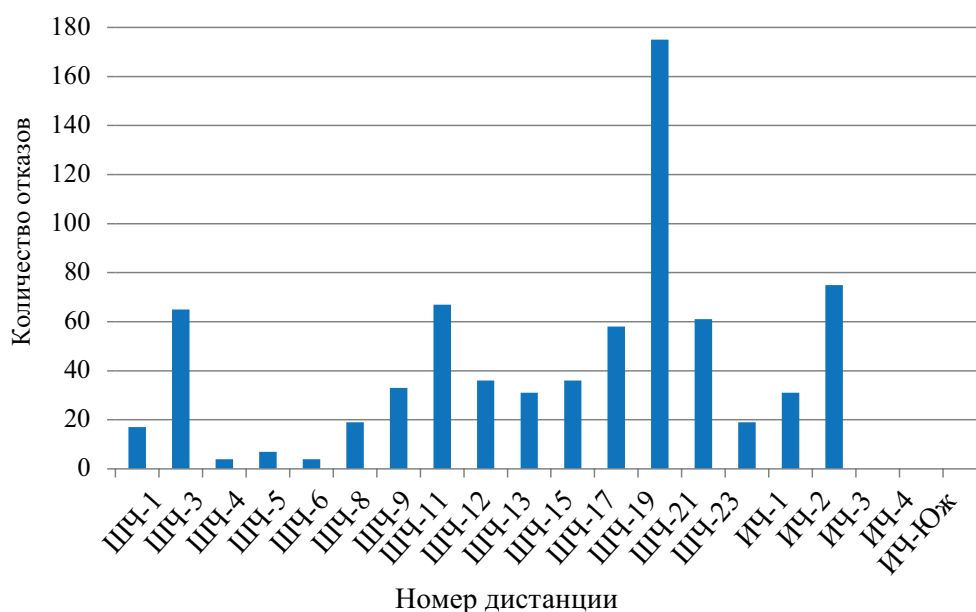


Рис. 7. Распределение отказов устройств по вводам питания устройств ЖАТ

вводам питания устройств, а именно 809 отказов.

На рис. 7 показано распределение отказов устройств ЖАТ, вызванных действием атмосферных ПН на вводы питания устройств по дистанциям СЦБ и инфраструктуры в период с 2014 по 2024 г.

Среднее количество отказов по дистанциям СЦБ и инфраструктуры равняется 36 отказам. Наибольшее количество отказов зафиксировано в ШЧ-19 и составляет 195 отказов. В дистанции инфраструктуры ИЧ-2 зафиксировано 75 отказов. В ШЧ-11 зафиксировано 67 отказов. В ШЧ-21 зафиксирован 61 отказ. В ШЧ-17 зафиксировано 58 отказов. Также стоит отметить, что в дистанциях ИЧ-3, ИЧ-4, ИЧ-Юж. отказов по вводам питания не зафиксировано. Из рис. 7 видно, что отказы распределяются неравномерно, 60 % отказов приходится на дистанции: ШЧ-11, ШЧ-17, ШЧ-19, ШЧ-21, ИЧ-2.

2. Анализ распределения отказов устройств ЖАТ по устройствам и средствам защиты

Распределение отказов устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по типам аппаратуры и по типам средств защиты за период с 2014 по 2024 г. показано на рис. 8. При анализе поврежденных приборов не учитывались

случаи повреждений, которые происходили реже одного раза в год.

Из анализа рис. 8 следует, что наибольшее количество повреждений пришлось на реле ИВГ, а именно 91 повреждение, что составляет 8,27 % от общего количества поврежденных приборов. Это обусловлено тем, что данное устройство работает в импульсном режиме и имеет в своей конструкции полупроводниковые элементы, а именно кремниевые диоды, образующие выпрямительный мост [15]. Повреждения реле ИВГ произошли по следующим причинам:

- пробой диода — 59 случаев;
- неисправность геркона — 23 случая;
- подгар контактов — 4 случая;
- сваривание контактов — 3 случая.

Следует отметить, что в двух случаях причину повреждения реле ИВГ установить не удалось: после нарушения нормальная работа реле восстанавливалась, а его параметры соответствовали норме.

Следующим по количеству повреждений идет реле НМШ — зафиксировано 65 случаев, что составляет 5,9 % от общего числа поврежденных приборов.

Наибольшее количество повреждений реле НМШ связано с обрывом обмотки реле — 24, термическим разрушением реле — 18 повреж-

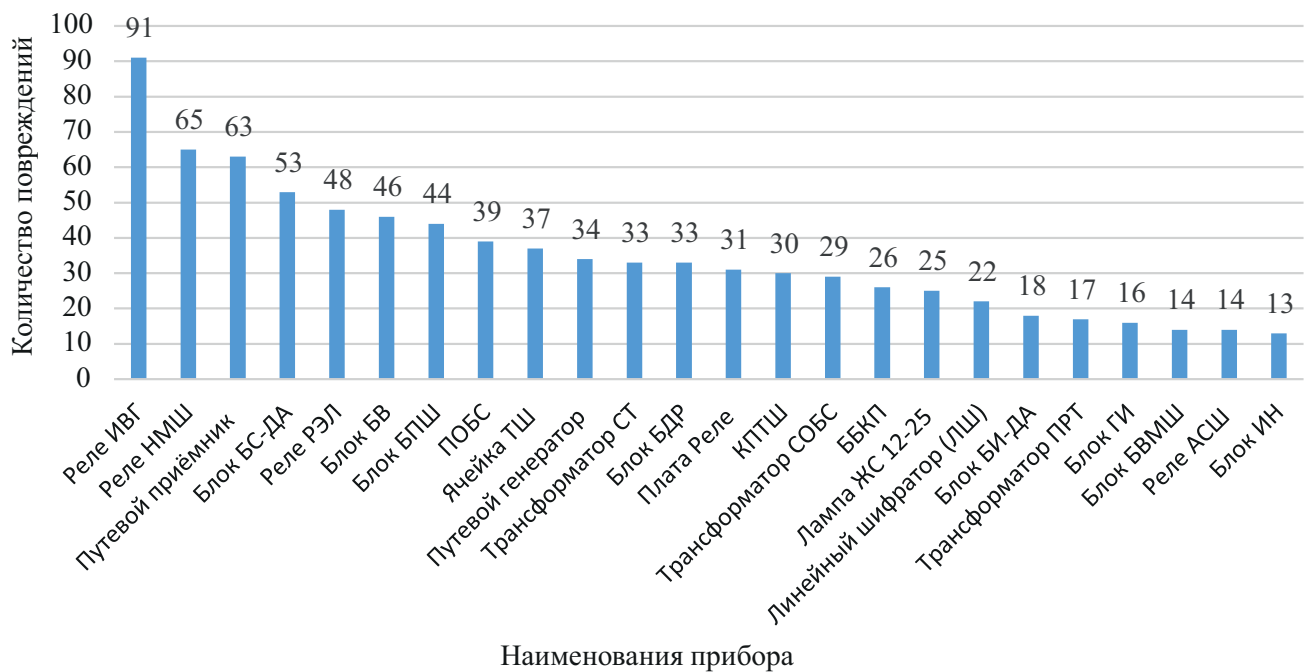


Рис. 8. Распределение отказов по типам поврежденной аппаратуры

дений, повышенным переходным сопротивлением между контактами — 8 повреждений, свариванием контактов — 3 повреждения, подгаром контактов — 2 повреждения.

Далее по количеству повреждений идет путьевой приемник тональной рельсовой цепи (ПП) — 63 повреждения, что составляет 5,7 % от общего числа поврежденных приборов. Наибольшее количество повреждений путьевых приемников приходится на полупроводниковые элементы, входящие в их конструкцию [16].

Причины повреждений путьевых приемников:

- пробой диода — 19 случаев;
- пробой транзистора — 19 случаев;
- пробой конденсатора — 11 случаев;
- термическое разрушение приемника — 11 случаев;
- перегорание резистора — 3 случая.

Следующим по количеству повреждений идет блок счетчиков дешифраторной ячейки (БС-ДА) — зафиксировано 53 повреждения, что составляет 4,8 % от общего числа повреждений приборов.

Подавляющее большинство повреждений БС-ДА связано с полупроводниковыми элементами:

- пробой диода — 51 случай;
- перегорание резистора — 2 случая.

Следующим по количеству повреждений идет реле типа РЭЛ — 48 повреждений, что составляет 4,4 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения реле РЭЛ произошли по следующим причинам: обрыв обмотки — 31 случай, увеличение переходного сопротивления между контактами — 15 случаев, полное термическое разрушение реле — 2 случая.

Далее по количеству повреждений идет блок выпрямителей (БВ) — 46 повреждений, что составляет 4,3 % от общего числа повреждений приборов. Все повреждения блока БВ произошли по причине пробоя диода.

Следующим по количеству повреждений идет блок БПШ — 44 повреждения, что составляет 4,1 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения блока БПШ произошли по следующим причинам: Обрыв обмотки — 18 случаев, пробой диода — 16 случаев, пробой конденсатора — 6 случаев и неисправность изоляции — 4 случая.

На трансформатор типа ПОБС приходится 39 повреждений, что составляет 3,6 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения трансформатора ПОБС произошли по следующим причинам: межвитковое короткое замыкание — 29 случаев, неисправность изоляции — 5 случаев и обрыв обмотки — 5 случаев.

Реле типа ТШ получило повреждение в 37 случаях, что составляет 3,4 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения ТШ произошли по следующим причинам: неисправность изоляции — 15 случаев, подгар контактов — 8 случаев, сваривание контактов — 8 случаев и пробой диода — 6 случаев.

На путевой генератор пришлось 34 повреждения, что составляет 3,1 % от общего числа повреждений приборов. Повреждения генератора произошли по следующим причинам: пробой транзистора — 12 случаев, термическое разрушение генератора — 9 случаев, пробой диода — 8 случаев и пробой конденсатора — 5 случаев.

Далее по количеству повреждений идет сигнальный трансформатор СТ — 33 случая, что составляет 3 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения СТ произошли по следующим причинам: межвитковое короткое замыкание — 18 случаев, неисправность изоляции — 9 случаев и обрыв обмотки — 6 случаев. Также 33 повреждения пришлось на блок БДР. Все повреждения блока БДР произошли по причине пробоя диода.

На плату реле пришлось 31 повреждение, что составляет 2,8 % от общего числа повреждений приборов. Все неисправности платы связаны с ее прожогом.

Следующим по количеству повреждений идет трансмиттер КПТШ — 30 повреждений, что составляет 2,7 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения КПТШ произошли по следующим причинам: обрыв обмотки — 17 случаев и пробой изоляции — 13 случаев.

В 29 случаях повреждение получил трансформатор СОБС, что составляет 2,6 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения СОБС произошли по следующим причинам: обрыв обмотки — 15 случаев, межвитковое короткое замыкание — 14 случаев.

Следующим по количеству повреждений идет блок базовый контролируемого пункта диспетчерской централизации системы «Сетунь» (ББКП) — 26 повреждений, что составляет 2,3 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения ББКП произошли по следующим причинам: пробой

транзистора — 20 случаев, термическое разрушение — 6 случаев.

Далее по количеству отказов идет лампа ЖС 12-25 — 25 повреждений, что составляет 2,2 % от общего числа поврежденных приборов. Все повреждения лампы связаны с ее перегоранием.

Линейный шифратор (ЛШ) системы диспетчерской централизации «Нева» получил повреждения в 22 случаях, что составляет 2 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения ЛШ произошли по следующим причинам: пробой транзистора — 19 случаев и пробой диода — 3 случая.

На блок исключений кодовой блокировки (БИ-ДА) пришлось 18 повреждений, что составляет 1,6 % от общего числа поврежденных приборов. Все повреждения блока БИ-ДА произошли по причине пробоя диода.

Далее по количеству повреждений идет трансформатор типа ПРТ — 17 повреждений, что составляет 1,5 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения ПРТ произошли по следующим причинам: обрыв обмотки — 10 случаев и межвитковое короткое замыкание — 7 случаев.

Следующим по количеству повреждений идет генератор импульсов (ГИ) — 16 повреждений, что составляет 1,4 % от общего числа поврежденных приборов. Повреждения ГИ произошли по следующим причинам: пробой транзистора — 10 случаев и пробой диода — 6 случаев.

На блок выдержки времени (БВМШ) и реле типа АСШ пришлось по 14 повреждений, что составляет по 1,2 % процента от общего числа поврежденных приборов. Повреждения БВМШ произошли по следующим причинам: пробой транзистора — 8 случаев и пробой диода — 6 случаев. Повреждения реле АСШ зафиксированы по следующим причинам: сваривание контактов — 8 случаев, подгар контактов — 4 случая и пробой диода — 2 случая.

Следующим по количеству повреждений идет блок инверторов (ИН) — зафиксировано 12 повреждений, что составляет 1,1 % от общего числа поврежденных приборов.

Все повреждения блока ИН вызваны пробоем транзистора.

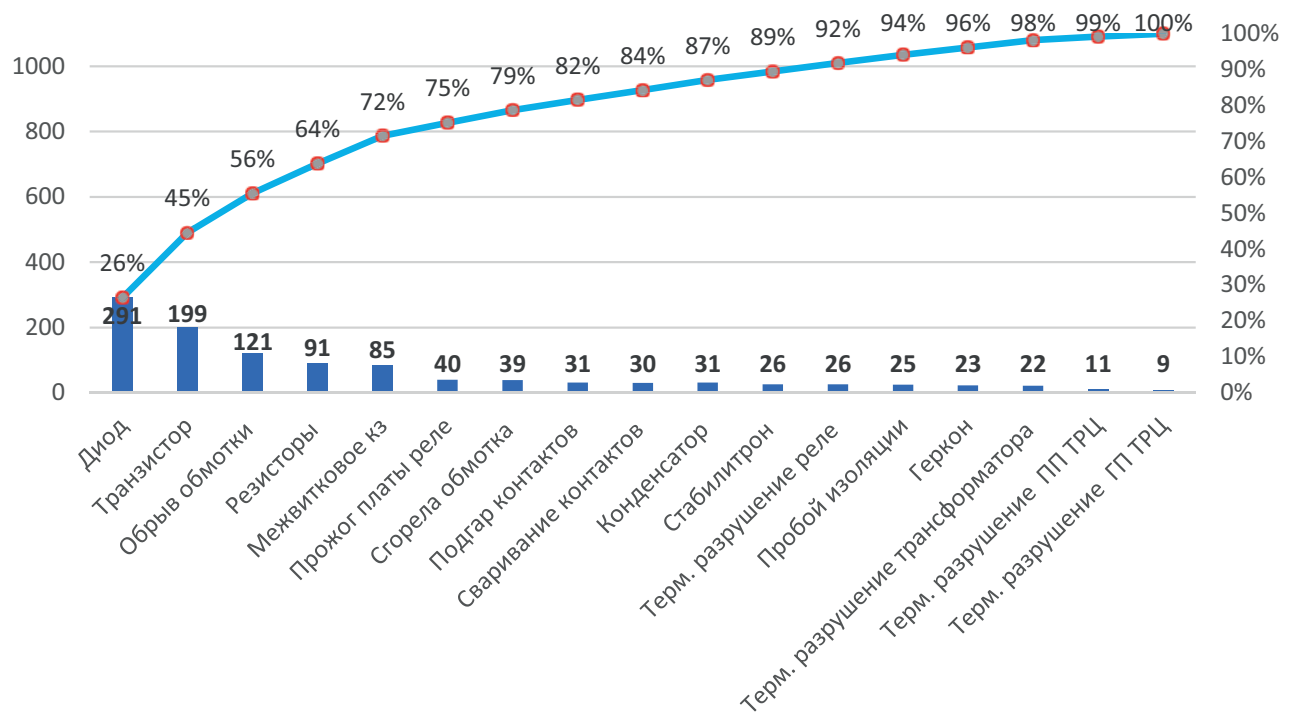


Рис. 9. Распределение повреждений устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по характеру неисправности

На рис. 9 показано распределение повреждений устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по характеру неисправности. На рис. 9 использован трехуровневый принцип Парето, пунктирной заливкой отмечены события, требующие особого внимания, сплошной заливкой отмечены события, требующие обычного внимания, а диагональными линиями отмечены события не требующие внимания вовсе.

На рис. 10 показано распределение поврежденных средств защиты по их типам в период с 2014 по 2024 г. При анализе также применялся трехуровневый принцип Парето.

Средства защиты от действия атмосферных ПН не сработали в 605 случаях, что составляет 45 % от общего числа отказов.

В остальных случаях средства защиты вышли из строя в следующем количестве: предохранители — 393 шт., выравнители типов ВОЦН и ВОЦШ — 212, устройства защиты от перенапряжений (УЗП) — 81 шт., автоматические выключатели многократного действия (АВМ) — 41 шт., разрядники РКН — 41 шт., разрядники РВНШ-250 — 23 шт., устройство защиты тиристорное (УЗТ) — 12 шт., защитный блок фильтр (ЗБФ) — 5 шт., защитный фильтр ЗФ-220 — 4 шт.

Стоит отметить, что выравнители ВОЦН и ВОЦШ объединены в одну группу, так как в них используются варисторы одного и того же типа, различие данных средств защиты состоит лишь в конструкции их выводов.

Кроме этого, стоит отметить, что малое количество повреждений УЗП в сопоставлении с выравнителями типов ВОЦН/ВОЦШ обусловлено более поздним началом их массового применения в качестве средств защиты — после 2014 г.

Проведенный анализ показывает, что существующие средства грозозащиты не обеспечивают гарантированного уровня защиты устройств от воздействия атмосферных (ПН).

3. Анализ распределения отказов устройств ЖАТ по системам

В процессе анализа все системы ЖАТ были разделены на 4 группы:

1. Системы управления движением поездов на станции.
2. Системы интервального регулирования движения поездов на перегоне.
3. Системы диспетчерской централизации (ДЦ).

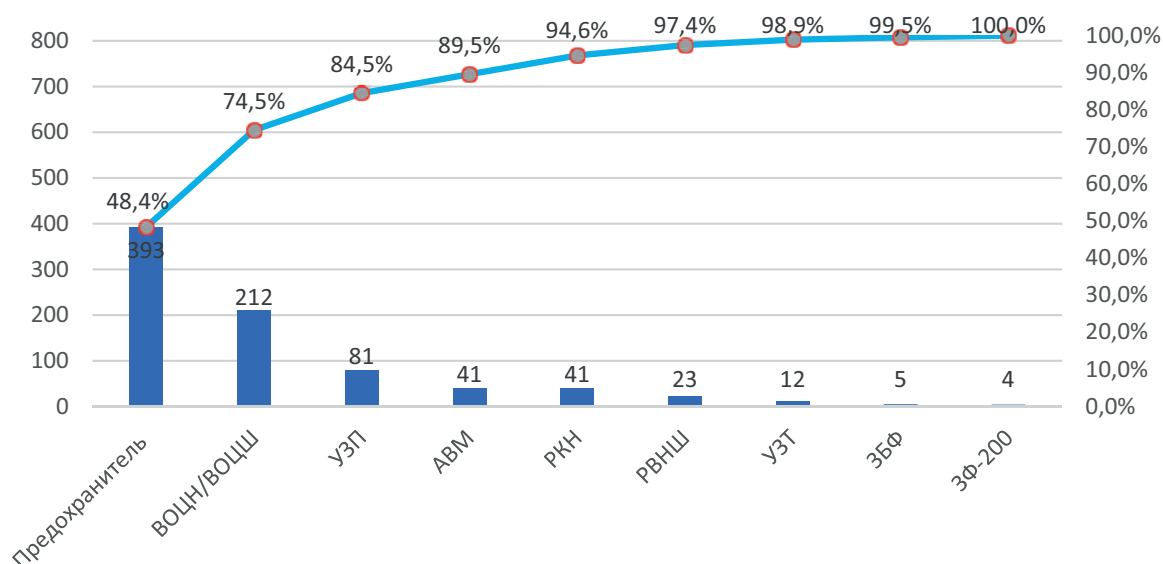


Рис. 10. Распределение поврежденных средств защиты по их типу в период с 2014 по 2024 г.

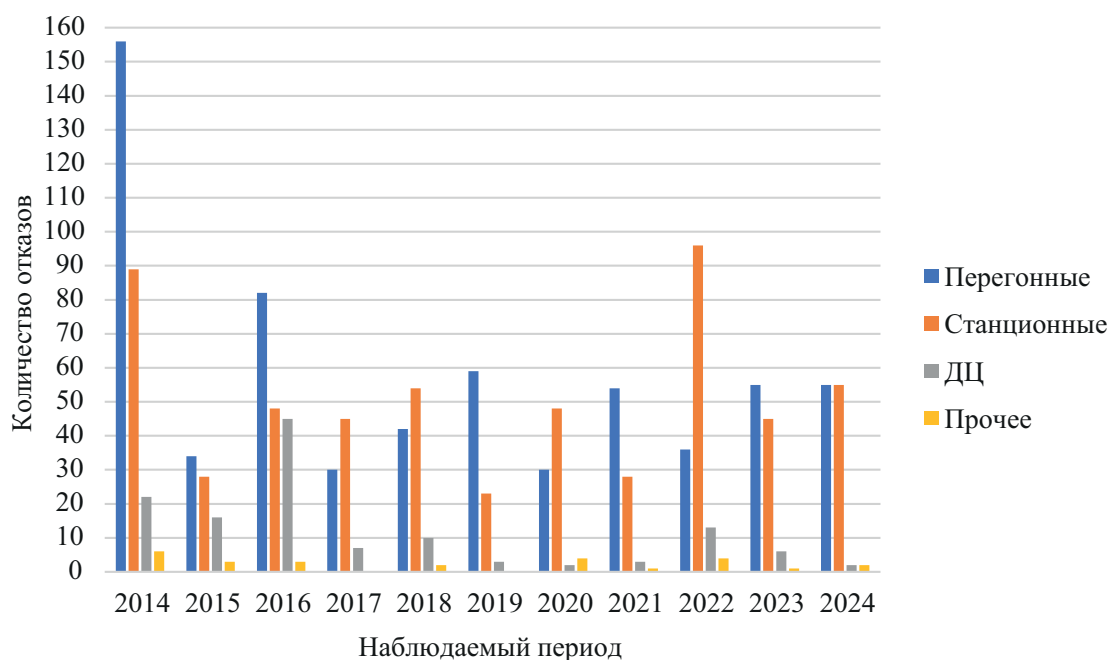


Рис. 11. Распределение отказов устройств по системам и по годам наблюдаемого периода

4. Системы, не входящие ни в одну из вышеперечисленных групп (КТСМ, ПОНАБ, ДИСК, УКСПС, СТДМ, АПС)

Распределение отказов устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по системам в период с 2014 по 2024 г. показано на рис. 11.

Согласно данным рис. 11, в разные годы наблюдаемого периода наибольшая доля отказов приходилась на различные системы ЖАТ. Так, в 2014 г. наибольшая доля отказов приходится на перегонные системы — 57 %. В 2015 г. также наибольшая доля приходится на

устройства перегонных систем — 42 %, при этом доля количества отказов перегонных систем в 2015 г. уменьшилась в 1,35 раза в сравнении с 2014 г. В 2016 г. вновь наибольшее количество отказов приходится на устройства перегонных систем — 46 %, при этом доля количества отказов увеличилась в сравнении с 2015, но при этом была меньше, чем в 2014 г. В 2017-м наибольшее количество отказов приходится на устройства станционных систем — 55 %. В 2018 г. наибольшая доля отказов приходится на устройство станционных систем — 50 %, при этом

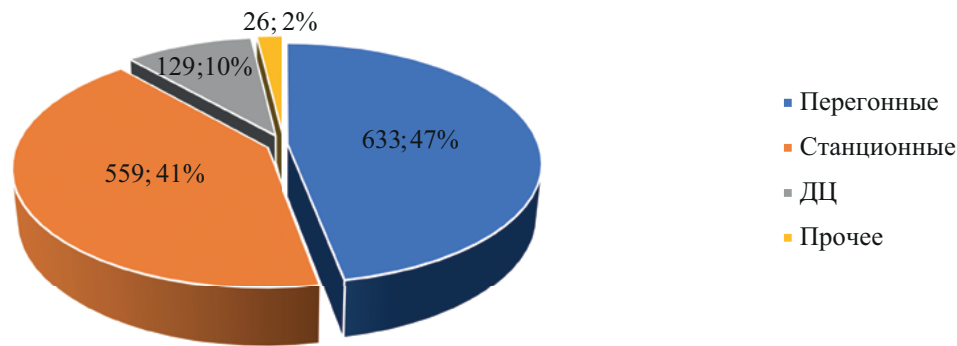


Рис. 12. Распределение отказов устройств по системам за весь наблюдаемый период

доля количества отказов станционных систем уменьшилась в сравнении с 2017 г. в 1,1 раза. В 2019-м наибольшая доля отказов приходится на перегонные системы — 69 %, при этом доля отказов перегонных систем увеличилась в 1,21 раза в сравнении с 2014 г. В 2020 г. наибольшая доля отказов приходится на станционные системы — 57 %. В 2021-м наибольшая доля отказов приходится на перегонные системы — 63 %. В 2022 г. наибольшая доля отказов приходится на станционные системы — 64 %. В 2023 г. наибольшая доля отказов приходится на перегонные системы — 51 %. В 2024 г. доля отказов устройств станционных и перегонных систем равна и составляет 48 %. Также стоит отметить высокий процент отказов устройств диспетчерской централизации в 2016 г. — 26 %.

Далее был выполнен анализ отказов устройств по системам за весь наблюдаемый период. Из рис. 12 видно, что на перегонные системы приходится наибольшее количество отказов, а именно 633, что составляет 47 % от общего числа отказов. На станционные системы приходится 559 отказов, что составляет 41 % от общего числа отказов. На устройства ДЦ приходится 129 отказов, что составляет 10 % от общего числа отказов. На прочие системы приходится 26 отказов, что составляет 2 % от общего числа отказов. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что основное внимание необходимо обратить на системы автоматической блокировки и электрической централизации.

Далее был выполнен анализ распределения отказов устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по месяцам грозовой активности. Как было сказано выше, грозовой период в пределах Октябрьской железной дороги начинается

в мае, а заканчивается в сентябре. Распределение отказов устройств ЖАТ от действия атмосферных ПН по месяцам грозовой активности в период с 2014 по 2024 г. приведено на рис. 13.

Из рис. 13 следует, что в разные годы наблюдаемого периода наибольшая доля отказов приходилась на разные месяцы. Так, в 2014 г. наибольшая доля отказов пришлась на июль — 41 %. В 2015 г. ситуация не изменилась: наибольшая доля отказов была зафиксирована в июле — 40 %. В 2016 г. ситуация также не изменилась: наибольшая доля отказов пришлась на июль — 62 %. В 2017 г. вновь наибольшая доля отказов пришлась на июль — 38 %. В 2018 г. ситуация изменилась, и наибольшая доля отказов пришлась на август — 35 %. В 2019 г. ситуация изменилась вновь, и наибольшая доля отказов пришлась на июнь — 39 %. В 2020 г. ситуация аналогична ситуации 2018 г.: наибольшая доля отказов пришлась на август — 32 %. В 2021 г. произошли существенные изменения: наибольшая доля отказов пришлась на июнь и май — 29 %. В 2022 г. снова произошли изменения: наибольшая доля отказов пришлась на июль — 53 %. В 2023 г. наибольшая доля отказов вновь пришлась на июль — 29 %. В 2024 г. ситуация опять изменилась: наибольшая доля отказов пришлась на июнь — 41 %.

Стоит отметить: в 2018 г. доля количества отказов в августе и в июле отличается незначительно, а именно на 2 %. В 2020 г. доли количества отказов в августе, июле и июне различаются не существенно и находятся в диапазоне от 32 % до 28 %. В 2023 г. доли количества отказов в августе, июле и июне находятся в диапазоне от 29 % до 26 %, а разница долей между июлем и августом составляет менее 1 %.

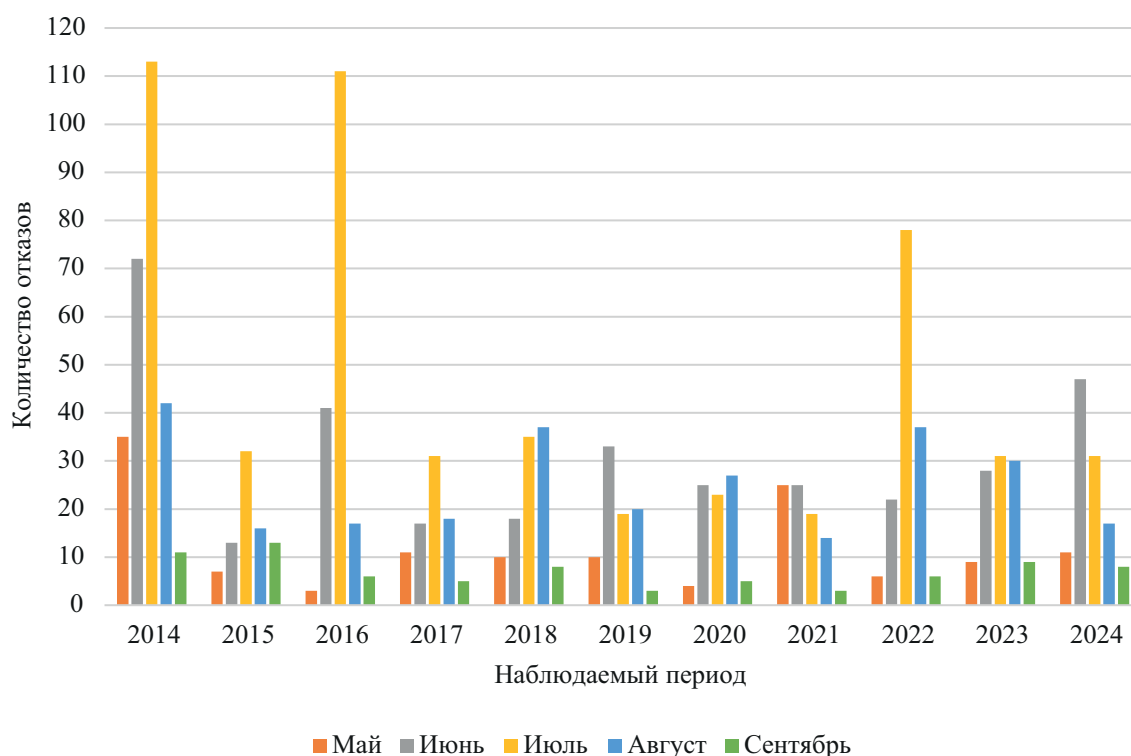


Рис. 13. Распределение отказов устройств по месяцам грозовой активности и по годам наблюдаемого периода

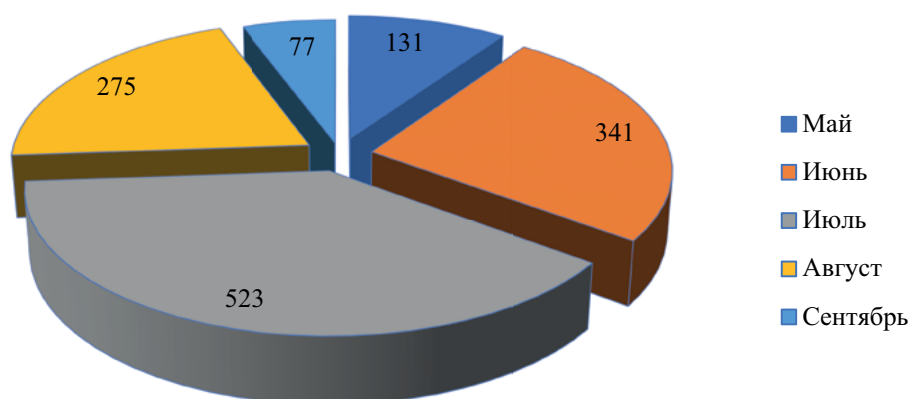


Рис. 14. Распределения отказов устройств ЖАТ по месяцам грозовой активности за весь наблюдаемый период

На рис. 14 показано распределение отказов устройств по месяцам грозовой активности за весь наблюдаемый период.

Из рис. 14 следует, что наибольшее количество отказов от действия атмосферных ПН приходится на июль — 523 отказа, что составляет 39 % от общего числа отказов. В июне зафиксирован 341 отказ, что составляет 25 % от общего числа отказов. В августе зафиксировано 275 отказов, что составляет 21 % от общего числа отказов. В мае зафиксирован 131 отказ,

что составляет 10 % от общего числа отказов. В сентябре зафиксировано 77 отказов, что составляет 6 % от общего числа отказов.

Заключение

В результате анализа грозовой активности на полигоне Октябрьской железной дороги за период 2014–2024 гг. установлено, что наибольшее количество грозowych дней зафиксировано в границах дистанций, прилегающих к водоемам (озерам и рекам).

Наибольшее число отказов устройств ЖАТ наблюдается на дистанциях, где из-за высокого удельного сопротивления грунта невозможно обеспечить требуемое сопротивление заземления.

Из общего числа отказов устройств ЖАТ, вызванных воздействием атмосферных ПН, 60 % пришлось на вводы питания.

Повреждения приборов и средств защиты распределяются по дистанциям неравномерно. Для оценки эффективности мероприятий по защите устройств ЖАТ от атмосферных ПН в работе введены два дополнительных показателя:

- коэффициент относительной опасности грозы (K_{OG});
- коэффициент относительной опасности отказа (C_{OO}).

Анализ показал, что применяемые в настоящее время методы защиты устройств ЖАТ от атмосферных перенапряжений недостаточно эффективны. Следовательно, требуется разработка новых методов и технических решений для повышения защищенности устройств ЖАТ.

По мнению авторов, перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- разработка технических решений и обоснование целесообразности организации защищенных подходов к вводам питания устройств ЖАТ;
- разработка и оценка эффективности активного метода защиты устройств ЖАТ от перенапряжений. ▲

Список источников

1. Шатров Е. Н. Защита устройств электропитания систем железнодорожной автоматики и телемеханики методом снижения градиентов атмосферных и коммутационных перенапряжений: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Н. Шатров. — СПб., 2008. — 17 с.
2. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учебное пособие для специалистов / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов и др. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. — 318 с.
3. Евсеев И. Г. Электромагнитное влияние устанавливаемых процессов в контактной сети электрифицированной железной дороги и линии электропередачи на цепи сигнализации и связи: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Г. Евсеев. — М., 1953. — 13 с.
4. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А. М. Костроминов. — М.: Транспорт, 1995. — 192 с.
5. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. — М.: УМЦЖДТ, 2013. — 244 с.
6. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 1. — С. 7–27.
7. Костроминов А. А. Исследование феррорезонансных процессов в устройствах электропитания железнодорожной автоматики: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Костроминов. — СПб., 2001. — 173 с.
8. Kube K. Lightning protection of signaling and communication / K. Kube // Progressive Railroading. — 2000. — Iss. 9. — Pp. 70, 72.
9. Wiater J. Analysis of lightning hazards in the context of formal and technical requirements for facilities with designated explosion hazard zones / J. Wiater // Safety & Fire Technology. — 2025. — Pp. 70–76. — DOI: 10.12845/sft.65.1.2025.6.
10. Yokoyama S. Lightning detection and lightning protection of power systems in Japan / S. Yokoyama. — 2002. — Vol. 1 — Pp. 546–551. — DOI: 10.1109/TDC.2002.1178456.
11. Акимов В. А. Опасные гидрометеорологические явления на территории России: научно-популярное издание / В. А. Акимов, Р. А. Дурнев, Ю. И. Соколов; ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). — М., 2009. — 316 с.
12. Bazelyan E. M. Lightning physics and lightning protection / E. M. Bazelyan, Yu. P. Raizer. — Bristol: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2000. — 325 p.
13. Манаков А. Д. Воздействие перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» / А. Д. Манаков, А. А. Рахмонбердиев // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 3. — С. 338–355. — DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-338-355.
14. Манаков А. Д. Модели, методы и средства защиты электронных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от опасных электромагнитных воздействий: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Д. Манаков. — СПб., 2011. — 32 с.
15. Смагина В. А. Современные тенденции развития электромагнитных реле в устройствах сигнализации, централизации и блокировки / В. А. Смагина, Е. В. Бабец, С. В. Панфилов, А. С. Петрова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. — 2024. — Т. 1. — С. 345–350.
16. Кравцов Ю. А. Методика проверки помехоустойчивости приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 6(61). — С. 102–109.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 287–302
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302

Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltage on Railway Automation and Remote Control Devices

Information about authors

Solovyov A. D., Postgraduate Student. E-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

Manakov A. D., Doctor of Engineering, Professor of the Department.

E-mail: manakoff_2@mail.ru

Department of “Automation and Remote Control on Railways”, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Abstract: This paper presents the findings from an analysis of thunderstorm activity on the Oktyabrskaya Railway, focusing on signalling, centralization, blocking distances, and infrastructure distances, for the period from 2014 to 2024. The analysis investigates the distribution of failures of railway automation and remote control devices, alongside incidents of damaged overvoltage protection equipment. The analysis identifies the distances with the most inadequate atmospheric overvoltage protection and explores the factors contributing to this issue. A thorough examination of the distribution of failures of railway automation and remote control devices has been conducted, categorizing them by system and presenting them on a monthly basis throughout the thunderstorm season. The assessment included the distribution of damaged devices and protective equipment, organised by equipment type and nature of the malfunction, ultimately identifying the devices most vulnerable to damage. For a more detailed and objective analysis, it is proposed to consider additional indicators such as the relative thunderstorm hazard indicator and the relative failure hazard indicator.

Keywords: Atmospheric overvoltage; railway automation and remote control; thunderstorm protection equipment; failures of automation devices.

References

1. Shatrov E. N. *Zashchita ustroystv elektropitanii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki metodom snizheniya gradientov atmosferykh i kommutatsionnykh perenapryazheniy: spetsial'nost' 05.09.03 "Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy": avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Protection of Power Supply Devices of Railway Automation and Telemechanics Systems by Reducing Atmospheric and Switching Overvoltage Gradients: specialty 05.09.03 "Electrotechnical Complexes and Systems": author's abstract. dis. ... Cand. Engineering Sciences]. St. Petersburg, 2008, 17 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. et al. *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: uchebnoe posobie dlya spetsialistov* [Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook for specialists]. Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2017, 318 p. (In Russian)
3. Evseev I. G. *Elektromagnitnoe vliyaniye ustanavlivayushchikhsya protsessov v kontakt-noy seti elektrifitsirovannoy zheleznoy dorogi i linii elektroperedachi na tsepi signalizatsii i svyazi: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Electromagnetic influence of steady-state processes in the contact system of an electrified railway and power transmission lines on signaling and communication circuits: Abstract of a Cand. Sci. dissertation]. Moscow, 1953, 13 p. (In Russian)
4. Kostrominov A. M. *Zashchita ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot pomekh* [Protection of railway automation and remote control devices from interference]. Moscow: Transport Publ., 1995, 192 p. (In Russian)
5. Shamanov V. I. *Elektromagnitnaya sovместimost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Electromagnetic compatibility of railway automation and remote control systems]. Moscow: UMTsZhDT Publ., 2013, 244 p. (In Russian)
6. Kravtsov Yu. A. *Elektromagnitnaya sovместimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom* [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock with asynchronous traction drive]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2015, vol. 1, Iss. 1, pp. 7–27. (In Russian)
7. Kostrominov A. A. *Issledovanie ferorezonansnykh protsessov v ustroystvakh elektropitanii zheleznodorozhnoy avtomatiki: spetsial'nost' 05.09.03 "Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy": dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of feroresonance processes in power supply devices of railway automation: specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems": dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. St. Petersburg, 2001, 173 p. (In Russian)
8. Kube K. Lightning protection of signaling and communication. *Progressive Railroading*, 2000, Iss. 9, pp. 70, 72.
9. Wiater J. Analysis of lightning hazards in the context of formal and technical requirements for facilities with designated explosion hazard zones. *Safety & Fire Technology*, 2025, pp. 70–76. DOI: 10.12845/sft.65.1.2025.6.
10. Yokoyama S. Lightning detection and lightning protection of power systems in Japan, 2002, vol. 1, pp. 546–551. DOI: 10.1109/TDC.2002.1178456.
11. Akimov V. A., Durnev R. A., Sokolov Yu. I. *Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Rossii: nauchno-populyarnoe izdanie* [Dangerous hydrometeorological phenomena in Russia: popular science edition]. Moscow: FGU VNII GOChS (FTs) Publ., 2009, 316 p. (In Russian)
12. Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. *Lightning physics and lightning protection*. Bristol: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2000, 325 p.
13. Manakov A. D., Rakhmonberdiev A. A. *Vozdeystvie perenapryazheniy na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki AO "Uzbekiston temir yullari"* [Impact of overvoltages on railway automation and remote control devices of JSC "Uzbekistan Railways"]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2019, vol. 5, Iss. 3, pp. 338–355. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-338-355. (In Russian)
14. Manakov A. D. *Modeli, metody i sredstva zashchity elektronnykh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot opasnykh elektromagnitnykh vozdeystviy: spetsial'nost' 05.22.08 "Upravlenie protsessami perevozok": avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Models, methods and means of protecting electronic devices of railway automation and telemetry from hazardous electromagnetic influences: specialty 05.22.08 "Transportation process management": author's abstract. dis. ... Doctor of Engineering Sciences]. St. Petersburg, 2011, 32 p. (In Russian)
15. Smagina V. A., Babets E. V., Panfilov S. V., Petrova A. S. *Sovremennye tendentsii razvitiya elektromagnitnykh rele v ustroystvakh signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki* [Current trends in the development of electromagnetic relays in signaling, centralization and blocking devices]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of APR countries in the 21st century]. 2024, vol. 1, pp. 345–350. (In Russian)
16. Kravtsov Yu. A., Antonov A. A., Bakin M. E. *Metodika proverki pomekhoustoychivosti priemnikov tonal'nykh rel'sovykh tsepey* [Methodology for testing the noise immunity of tone track circuit receivers]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2015, vol. 13, Iss. 6(61), pp. 102–109. (In Russian)

О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛИГОННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ДОЛГИЙ Александр Игоревич, канд. техн. наук, генеральный директор; e-mail: a.dolgiy@vniias.ru

РОЗЕНБЕРГ Ефим Наумович, д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора;

e-mail: info@vniias.ru

ОЛЬШАНСКИЙ Алексей Михайлович, канд. техн. наук, Центр математического, компьютерного моделирования и когнитивных исследований; e-mail: a.olshanskiy@vniias.ru

ОЗЕРОВ Алексей Валерьевич, Международное управление — Центр управления интеллектуальной собственностью; e-mail: a.ozerov@vniias.ru

АО «НИИАС», Москва

Статья посвящена рассмотрению некоторых аспектов обеспечения управления перевозочным процессом на магистральном железнодорожном транспорте в условиях роста масштабов внедрения цифровых технологий. Несмотря на высокий уровень автоматизации сбора данных и рутинных операций, ключевые решения при отказах и нештатных ситуациях по-прежнему зависят от опыта диспетчера, а универсальные модели для таких случаев отсутствуют. В статье рассмотрены тренды развития центров управления перевозками (облачные вычисления, адаптивное планирование с применением искусственного интеллекта, интеграция систем), выявлена проблема недостаточной формализации управления при отказах на крупных полигонах, предложена общая модель оценки состояний в ситуации реагирования на отказы, рассмотрена роль информационного временного резерва при восстановлении полигонных систем управления.

Ключевые слова: граф событий; искусственные нейронные сети; марковская модель; перевозочный процесс; полигон управления; центр управления перевозками; железнодорожная автоматика и телемеханика.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-303-312

▼ Введение

Современная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте характеризуется фрагментарной автоматизацией цикла управления, при которой ключевые функции выбора и принятия управляющего решения по-прежнему остаются за диспетчером и зависят от его личного опыта и не до конца формализованных знаний (эвристических правил).

Одновременно с этим присутствует отчетливый тренд на укрупнение диспетчерских участков управления и переход на полигонные модели управления. Так, если в начале XX в. протяженность диспетчерского участка под управлением одного диспетчера составляла от 30 до 50 км, то в начале XXI в. она выросла до 250–300 км и продолжает увеличиваться.

Современная концепция центров управления перевозками (ЦУП) на железных дорогах

сложилась в конце 1990-х — начале 2000-х гг. в связи с масштабным переводом железнодорожных систем железнодорожной автоматики и телемеханики на микропроцессорную технику, массовым внедрением автоматизированных рабочих мест на базе высокопроизводительных персональных компьютеров и строительством сетей передачи данных с высокой пропускной способностью на основе волоконно-оптических линий. Последнее обеспечило принципиально иной уровень автоматизации сбора и передачи информации и, как следствие, позволило добиться значительно большей централизации диспетчерского контроля и управления с концентрацией оперативного диспетчерского персонала в дорожных (региональных) центрах, объединяющих диспетчерские участки в рамках одной или нескольких дорог. Эволюция центров управления на железнодорожном транспорте подробно

изложена в [1], где новое целевое состояние характеризуется целым рядом отличительных черт, среди которых:

- применение облачного хранения и обработки данных;
- внедрение адаптивного планирования перевозочного процесса с применением подходов, включающих элементы машинного обучения и цифровых двойников;
- единая мультиагентная программно-аппаратная платформа с тесной программной интеграцией модулей планирования, построения, ведения и корректировки графика движения поездов с учетом конфликтов и сбойных ситуаций, управления тяговыми ресурсами, локомотивными бригадами, инфраструктурой и т. д.;
- реализация режима оперативного управления за счет интеграции с системами автоматической установки маршрутов;
- интеграция с бортовыми локомотивными средствами автоведения и системами самодиагностики подвижного состава.

Вычислительные возможности современных программно-аппаратных средств позволяют оперировать гораздо большим объемом данных с гораздо большей скоростью и автоматизировать все большее количество операций диспетчерского управления, относящихся к его основным задачам. Последние включают оперативный контроль, принятие оперативных и упреждающих решений по организации перевозочной деятельности на сети железных дорог, предупреждение и решение конфликтных ситуаций, координацию работ по устранению нештатных ситуаций, взаимодействие со смежными железнодорожными администрациями и другими видами транспорта, планирование и анализ показателей перевозочного процесса.

Следует отметить, что при активном внедрении режима автоматической установки маршрутов и беспилотного вождения поездов все большая часть функций ответственной системы, связанной с безопасностью движения поездов, может переноситься в ЦУП. В связи с этим может возникать вопрос о необходимости обеспечения соответствующего уровня функциональной безопасности управляющего программно-аппаратного комплекса.

Анализ функциональной безопасности таких комплексов — отдельное, потенциально перспективное направление исследований [2]. При формировании концепции функциональной безопасности данной сложной системы управления, объединяющей в своем составе большое количество подсистем, должны учитываться все риски, связанные с виртуализацией системы управления и распределением уровней полноты обеспечения безопасности между подсистемами [3].

Между тем оперативному персоналу приходится принимать решения в отношении ниток графика движения поездов и при отказах и предотказных состояниях транспортной инфраструктуры в рамках протяженных полигонов управления. Для таких случаев в настоящее время общая модель ситуации не выработана, управление сводится к выполнению последовательности регламентных действий, причем последствия принятого управляющего воздействия существенно отличаются в зависимости от того, в каком порядке и насколько качественно были реализованы необходимые шаги, а также в зависимости от технического оснащения разных участков железных дорог, от опыта диспетчеров и от сложившейся поездной обстановки.

Таким образом, проблема выстраивания системы достаточного по временным, технологическим и экономическим критериям управления работой полигонов в условиях действия сценарных возмущений и отказных ситуаций сводится к учету не только надежности аппаратных и программных средств, но и к анализу надежности управленческого контура, включая процесс выбора альтернативы и реализации управленческих решений.

Под управленческими решениями в данном случае понимается набор дискретных команд на выполнение вполне конкретных технологических операций.

Целью настоящей статьи является построение рациональной стратегии при восстановлении полигонных систем управления и предложение сценариев к решению задачи управления состоянием сложных систем на транспорте с точки зрения ведения эксплуатационной работы.

В отличие от задач по анализу исправности различных систем, вопросы оценки рисков и последствий для области управления движением с позиций марковских и полумарковских цепей рассмотрены в недостаточной степени.

1. Базовая модель оценки состояний

В рамках данного подхода была разработана одна из моделей сценариев угроз для подвижного состава, в которой предложен базовый набор эксплуатационных сценариев типов «известные безопасные» и «известные небезопасные», которые должны учитываться при построении модели безопасности с формированием общей библиотеки сценариев [4].

Недостатком предложенного подхода можно назвать то, что такая модель преимущественно ориентирована на замкнутые полигоны типа Московского центрального кольца с ограниченным количеством задействованных элементов (главным образом подвижного состава).

Для формализации стандартного управления и минимизации технико-экономических последствий (в частности, задержек поездов) требуется вывести общую модель оценки состояний в ситуации реагирования на отказы. Такая модель впоследствии ляжет в основу типовых рекомендаций и программных решений для реагирования на отклонения в работе полигонов и направлений.

При формировании такой модели следует принять ряд допущений:

1. Основным измерителем затрат на реагирование становится время в натуральном (час) или условно-натуральном статистическом формате (поездо-час).

2. В качестве типовой реакции на случившийся отказ или появление неблагоприятного состояния в системе выступает определенный сценарий реагирования (заранее просчитанный или требующий своего расчета).

3. С ростом линейных размеров полигона и его насыщения объектами управления существует некоторая общая функция временных затрат вида:

$$Z(C, L) = \frac{t(C, L)}{C} + b(C, L), \quad (1)$$

где $Z(C, L)$ — функция затрат на реагирование для C состояний в системе и L км полигона; $t(C, L)$ — некоторый первоначальный лимит времени реагирования; $b(C, L)$ — функция удельной временной сложности на 1 сценарий.

Для элементарной системы, в которой все сценарии заранее просчитаны, доля второго компонента (1) в пределе равна 0, и затраты на принятие решений и корректировку полностью определяются заданными сценариями реагирования. Очевидно, что с ростом сложности полигона растут и затраты на принятие решения и корректировку работы. Исходим из того, что существует рациональное число сценариев C^* , при котором разработка детальных сценариев с номерами, превышающими C^* , становится избыточной.

Для каждого из семейств функций $b(C, L)$, $t(C, L)$ данное количество можно определить из условия:

$$C^*: \frac{dZ(C, L)}{dC} = 0. \quad (2)$$

В случае $b(C, L) = \text{const}$ мы приходим к формуле Вильсона, что в общем случае не помогает в решении задачи, поскольку подлежит уточнению конкретный характер функций $b(C, L)$, $t(C, L)$.

Дальнейшие выкладки будем производить в предположении о знании рационального количества сценариев C^* .

Рассмотрим элементарный граф системы (рис. 1) с шестью состояниями.

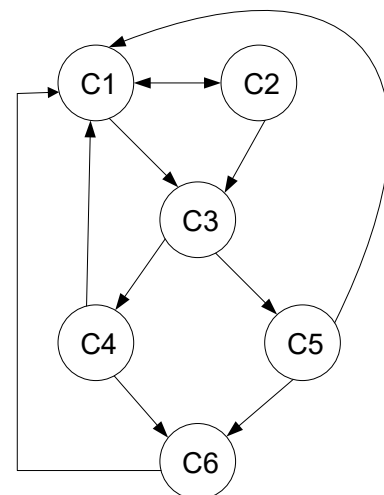


Рис. 1. Элементарный граф состояний системы

Данный граф включает в себя состояния:

- С1. Все компоненты (поезда) полигона исправны и работают штатно в составе системы, поезд движется по графику.
- С2. Поезд исправен, но движется с отставанием от графика по внешним причинам.
- С3. Какой-либо компонент поезда неисправен, при этом информация об этом в ЦУП отсутствует.
- С4. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, решение ситуации нетиповое, может повлечь задержку на его поиск.
- С5. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, сотрудник применяет типовое решение первой категории (регулировка, мелкий ремонт через машиниста-оператора).
- С6. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, типовое решение второй категории — съём поезда по невозможности устранения неисправности. В этом случае также возможно возникновение поиска решения.

В графе на рис. 1 предполагается, что возможны задержки в каждом из состояний, и это будет отражено в модели.

Природа состояний С4 и С6, а также С2 позволяет предположить два варианта развития ситуации.

2. Варианты (сценарии) решения задачи нахождения состояний системы

Вариант 1. Процессы в системе можно укрупненно представить как марковские и применить аппарат марковских случайных процессов [5].

Вариант 2. Процессы, связанные с указанными состояниями, немарковские, в таком случае возможно применение обучения с подкреплением для поиска рациональной стратегии исправления ситуации.

Рассмотрим подробнее данные варианты.

Вариант 1. Марковская модель. В этом случае процессы в системе могут быть описаны по примеру процессов в крупномасштабных системах [6].

Матрица переходов между состояниями, отраженными на рис. 1, может быть записана как:

$$\begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 \\ \lambda_{41} & 0 & 0 & \lambda_{44} & 0 & \lambda_{46} \\ \lambda_{51} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Предположим, что потоки переходов из состояния в состояние являются пуассоновскими с фиксированными интенсивностями перехода λ_{ij} из состояния с номером i в состояние с номером j . Такое предположение допустимо в силу того, что на рассматриваемом полигоне происходит значительное число независимых событий с различными техническими системами [7, 8].

В этом случае динамика вероятностей нахождения системы в каждом из состояний определяется системой дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова (4) при задании начальных значений вероятностей ($P_0(0), \dots, P_6(0)$) с соблюдением условия нормировки

$$\sum_{i=1}^6 P_i(t) = 1 :$$

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \\ + \lambda_{51}P_5(t) + \lambda_{61}P_6(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -\lambda_{21}P_2(t) - \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -\lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \\ + \lambda_{23}P_2(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = -\lambda_{51}P_5(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = -\lambda_{61}P_6(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{56}P_5(t). \end{cases} \quad (4)$$

При составлении системы дифференциальных уравнений (4) применялось известное мнемоническое правило составления уравнений А. Н. Колмогорова [6].

Финальные вероятности нахождения в каждом из шести состояний по приведенному на

рис. 1 графу можно определить, решая систему уравнений (5) с учетом условия нормировки:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \\ + \lambda_{51}P_5(t) + \lambda_{61}P_6(t), \\ 0 = -\lambda_{21}P_2(t) - \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t), \\ 0 = -\lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t), \\ 0 = -\lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ 0 = -\lambda_{51}P_5(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\ 0 = -\lambda_{61}P_6(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{56}P_5(t). \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) может быть решена любым методом решения систем линейных алгебраических уравнений.

Отметим, что значения интенсивностей перехода в матрице (3) определяются исходя из практики работы железнодорожных систем с похожими характеристиками, паспортных характеристик использованных решений и других источников. В качестве таких источников могут выступать внедренные системы КАСАТ и КАСАНТ (для полигонов Московского центрального кольца и Московских центральных диаметров).

При этом в случае получения по итогам решения (5) преобладания вероятности заданного финального состояния над остальными состояниями требуется разработать стратегию по резервированию системы в этом состоянии или по отражению соответствующих решений в составе некоторого информационного запаса, представляющего собой набор готовых действий для оперативного персонала.

Вариант 2. Процессы, связанные с указанными состояниями, немарковские.

В этом случае прибегнем к стратегии поиска оптимальной схемы действия с помощью Q -обучения или принципа оптимальности Р. Беллмана. Согласно этому принципу, независимо от текущего состояния системы и принимаемого на данном шаге решения оптимальная стратегия для перевода системы в исправное состояние обладает свойством: оставшаяся часть пути к исправному состоянию также должна быть оптимальной по тому же критерию.

Для каждого перехода из состояния в состояние в соответствии с матрицей (3) задается

некоторая стоимость перехода $c_{ij} = \gamma^n f(i, g_{ij}, j)$, где i, j — номера состояний, g_{ij} — некоторое действие над системой, которое побудило перейти из состояния i в состояние j , f — некоторая заданная функция (аналитическая или табличная), γ^n — дисконтный множитель, зависящий от номера шага n и принимающий значения от 0 (система не обладает свойством предвидения и видит только настоящее) до 1 (система полностью ориентирована на будущие значения и не придает значения настоящим затратам).

С позиций содержания постановки задачи функция затрат может быть временной, временно-стоимостной, учитывать технологические операции и задержки, а также возможные потери провозной способности при переходе системы по графу состояний (рис. 1).

Стратегия $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots\}$ представляет собой последовательность действий для диспетчера ЦУП, при котором $\exists \mu_i : C_i \rightarrow G_n = f$ для моментов времени $n = 0, 1, 2, \dots$, то есть это набор функций отображения состояний системы в действия, которые обладают соответствующей стоимостью c_{ij} , введенной выше.

Если функции μ_i на каждом из n шагов принадлежат множеству A допустимых управлений на данном шаге, то такая стратегия π называется допустимой стратегией.

Очевидно, что поиск должен производиться только на подмножестве допустимых стратегий, которое для диспетчера определяется исходя из особенностей работы систем железнодорожной автоматики линии, эксплуатационной нагрузки, уровня связи и других внешних параметров.

Введем в рассмотрение функционал (6) вида:

$$J^\pi(i) = M \left[\sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n f(C_n, \mu_n((C_n, C_{n+1}) | C_0 = i)) \right] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Данный функционал определяет математическое ожидание затрат при переходе по стратегии π из начального состояния i для графа состояния системы C_n и дискретного бесконечного времени $k = 0 \dots n$ при выборе функций

перехода μ_n . Функционал (6) необходимо минимизировать.

Таким образом, в процессе восстановления железнодорожной линии поставлена задача построения квазистационарной шаговой стратегии (так как в общем случае мы не гарантируем неизменности самих состояний и функций μ_n во времени) перехода к исправному состоянию. Данная задача, строго говоря, приводит к системе из N уравнений, в котором для каждого состояния приходится одна переменная стоимости [9].

Скажем несколько слов о решении задачи (6). Оно может быть получено с помощью итераций по стратегиям, когда на первом шаге вычисляются оценки стоимости переходов в составе некоторой стратегии π , а на втором шаге полученная функция стоимости улучшается (шаги повторяются до достижения требуемой области значений функции стоимости), становясь жадной по отношению к функции на первом шаге, или с помощью итерации по значениям, когда исходно выбирается некоторая оценка выражения (6) для всех состояний в стратегии и для N уравнений Беллмана, а далее происходит минимизация функций $J^1, \dots, J^N$, после чего на множестве данных минимальных функций выстраивается жадная стратегия по стоимости или по Q -фактору.

Q -фактор представляет собой обобщенную сумму стоимостей текущего перехода из состояния i в состояние j и сумму дисконтированных стоимостей всех дальнейших переходов μ_i в состояния для выбранной стратегии.

В целях сокращения временных и вычислительных затрат на решение задачи (6) возможно также перейти к нейродинамическому программированию, предоставив поиск субоптимального решения задачи (6) искусственной нейронной сети. Это также может быть полезным и потому, что знание значений в матрице переходов может отсутствовать или быть неполным, в особенности при принятии решения о применении технологических решений, приводящих к новому состоянию линии. Возможны также дополнительные факторы в виде элементов теоретико-игровых решений [10] — например, когда контроль состояния ведут два и более лица, принимающих решения

на разных иерархических уровнях (станция, дорога или представитель хозяйства перевозок и аппарата ревизоров по безопасности движения поездов). Очевидно, что в такой ситуации значения стоимостей перехода изменяются во времени и по величине.

Использование данных подходов возможно не только для задачи определения рациональной схемы поведения при эксплуатации сложных технологических систем на транспорте, но и для решения задач построения адаптивного плана формирования поездов и маршрутов.

3. Информационный запас как инструмент стратегии управления

Отдельно рассмотрим аспекты, описанные выше для моделирования процессов восстановления систем, с позиций теории надежности восстанавливаемых систем [11]. В отличие от систем, в которых применяются аппаратные запасы и принадлежности (ЗИП) как способ восстановления работоспособности, в системах управления работой ЦУП в качестве аналогов технических ЗИП выступают наборы дискретных команд — «информационный ЗИП» (*авторский термин*), отработанные ранее на тестовых полигонах или на практике.

Воспользуемся понятием временного резерва — отрезка времени, в течение которого может быть передан набор дискретных управляющих команд в области изменения технологического состояния анализируемой железнодорожной системы.

С увеличением сложности ЦУП и управляемой системы должна пропорционально расти и сложность применяемых управлений. Таким образом, естественно в качестве меры сложности применить индекс информационного разнообразия с применением, например, энтропийного подхода [12].

Рассматриваемая система классифицируется сложным образом, попадая в ряде случаев в несколько подмножеств для разного режима работы:

1. По степени иерархичности: система иерархическая, включающая в себя ЦУП, районы управления, поезда на диспетчерском участке.
2. По типу структуры информационного временного резерва: многоуровневая, так как

возможные команды могут затрагивать как поезда, так и районы управления, одновременно с этим район управления также обладает набором информационно-управляющих воздействий.

3. По типу подключения: система без корректировок в процессе действия (в штатном режиме работы), с корректировками в случае нехватки информационного запаса и началом создания очередей заявок (поездов).

4. По стратегии пополнения запасов: система непрерывного действия, с периодическим экстренным пополнением (пополнение фактически происходит в момент чрезвычайной ситуации).

5. По расчетам системы массового обслуживания: в устойчивом режиме интенсивность запросов совпадает с «потреблением» управляющих команд/ресурсов, в период превышения наблюдаются растущие задержки по времени в процессе оказания управляющих воздействий.

6. По степени инерции реагирования: в штатном режиме система с почти мгновенной реакцией, в нештатном режиме при наличии в составе «информационного ЗИП» той или иной отработанной команды степень безынерционности сохраняется.

7. По типу модели надежности (по степени доверия) система может относиться к марковским системам, в которых реализуется описанное выше состояние Сб — «Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно; типовое решение второй категории — съём поезда по невозможности устранения неисправности».

Однако итоговое влияние на режим работы полигона определяется не только интенсивностями отказа и восстановления управленческого контура системы, но и количеством сорванных с графика и задержанных поездов.

Введем некоторые соображения по оценке численных характеристик систем с временным резервом, который выступает в виде защитных элементов в контуре принятия решений.

Известно, что применительно к обеспечению должной функциональной надежности систем управления структурное резервирование как способ повышения надежности не применяется, так как недочеты и ошибки в процессе выработки

управленческого решения нельзя устранить переключением на некоторый резерв, если данные ошибки связаны с неполнотой или ошибками во входных данных, случайными событиями и пр. Подобные ситуации чаще всего корректируются с помощью обеспечения информационной избыточности. Обеспечение такой избыточности достигается использованием временной, информационной, структурной избыточности в управляющем контуре, что корреспондирует с идеей максимизации информационного разнообразия управленческих решений [13].

Предлагаемый авторами информационный временный резерв обеспечивает адаптацию системы «ЦУП — линия» к частичным отказам. В случае, если мы работаем с ресурсом времени и минимизируем допустимое время перерыва в работе информационно-управляющих систем, можно записать, что:

$$P_{\text{инфЗИП}}(t < T_{\text{иг}}) = \int_0^{T_{\text{иг}}} f(t) dt, \quad (7)$$

где t — время перерыва;

$T_{\text{иг}}$ — максимально допустимое время перерыва;

$f(t)$ — плотность распределения случайного времени в системе.

Оценим вероятность того, что в системе в процессе эксплуатации функциональные отказы не возникли (вероятность p_1) либо будут нейтрализованы с помощью временного резерва, для чего введем событие A с вероятностью:

$$P(A) = p_{\text{БО}} p_1 + (1 - p_{\text{БО}}) p_1 P_{\text{инфЗИП}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{БО}}$ — вероятность безотказного функционирования системы управления;

$P_{\text{инфЗИП}}$ — вероятность того, что решение из временного резерва нейтрализовало функциональный отказ.

Формула (8) определяет в итоге вероятность корректного выполнения задачи в управляющей системе ЦУП с наличием информационного временного резерва, при которой аппаратные средства защиты не привлекаются для решения задачи стабилизации системы параллельно с основными алгоритмами восстановления работоспособности.

В качестве дальнейшего исследования вопроса рассмотрим три варианта функционирования системы управления с информационным запасом:

B_1 — плановый режим,

B_2 — неплановый режим,

$\hat{A}_3 \subset \hat{A}_1$ — неплановый режим, функционирующий по алгоритму, содержащемуся в «информационном ЗИП».

Введем событие B — «функционирование системы».

Тогда

$$P(B) = P_{B_1} + P_{B_2} - P_{B_1}P_{B_2}, \quad (9)$$

а вероятность попадания в область, покрытую информационным запасом, оценивается как $P_3 = P_{B_1}P_{B_2}$.

При этом определение соответствующих вероятностей их соотношения (9) требует оценки потоков по И. Б. Шубинскому [14]. Оценку таких потоков логично провести через величины, обратные времени принятия решений. Время принятия решений в системе подчиняется следующему строгому двойному неравенству:

$$t_{\text{управл}} < t_{\text{управл}} + t_{\text{рз}} < t_{\text{чрезв}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{управл}}$ — время принятия решений в системе при работе в плановом режиме;

$t_{\text{рз}}$ — время активации управления из ассортимента информационного запаса;

$t_{\text{чрезв}}$ — время принятия решений при отсутствии готовых вариантов и необходимости выработать решение в режиме реального времени.

Между вероятностью адаптации системы управления к функциональным отказам с помощью временного резерва и вероятностями возникновения функциональных отказов существует определенная зависимость: «при сравнительно небольшом объеме информационного временного резерва эффективность защиты наибольшая, по мере роста объема (и разнообразия) временного резерва увеличивается вероятность успешной адаптации».

Однако приведенный вывод носит общий характер: как именно изменится соотношение количества устраняемых отказов средствами отказоустойчивости и функциональных

отказов при конкретном топологическом рисунке ЦУП и полигона — заранее неясно. Это требует проведения, как минимум, имитационного моделирования работы полигона с учетом соответствующих вероятностных характеристик элементов системы управления.

Кроме того, в зависимости от категории ЦУП и прилегающих линий, точности графика и скорости движения поездов должна быть принята соответствующая пороговая величина допустимой ненадежности средств систем управления [15], а также допустимого времени на передачу дискретных управляющих команд.

Основываясь на теории применения средств защиты в традиционных системах, кратко остановимся на граничных условиях работы с информационным временным резервом. Базовым условием можно считать выполнение принципа необходимого разнообразия У. Эшби [10]. Для рассматриваемой ситуации это означает, что уровень разнообразия вариантов, заложенных в составе информационного временного резерва, должен быть не ниже уровня разнообразия защищаемой системы управления.

Кроме того, очевидно, что объем решений (кода, процедур) по обеспечению устойчивости к функциональным отказам — а с точки зрения колмогоровской сложности систем управления, объем информационного временного резерва (включая загрузку управленческих вертикалей) — не должен превышать объема (и сложности) самой системы управления, применяемой в ЦУП [16].

Чем выше сложность и разнообразие состояний, в которых может находиться управляемая система, тем больший объем управленческих и технических решений следует включать в состав комбинации решений в рамках временного резерва.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены ключевые аспекты управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в условиях распределенных объектов управления с позиций восстановления нормальной работоспособности системы с учетом роста уровня автоматизации процессов и укрупнения диспетчерских участков.

Выполнена начальная формализация задачи оценки состояния поезда на линии при отказах на основе марковских и полумарковских моделей, а также методов обучения с подкреплением для создания различных стратегий восстановления после отказов. Предложена модель оценки состояний системы с учетом времени реагирования, сложности сценариев и экономической эффективности их применения. Впервые введено понятие информационного временного резерва, который позволяет снизить зависимость от человеческого фактора и ускорить восстановление работоспособности системы за счет заранее подготовленных управленческих решений. Проведен анализ вероятностных характеристик системы «ЦУП — полигон» с позиций теории надежности.

С учетом описанных в статье начальных положений представляется перспективным проведение дальнейших исследований по следующим направлениям:

- Углубленный анализ немарковских процессов в управлении перевозками с применением методов искусственного интеллекта.
- Разработка адаптивных алгоритмов для динамического пополнения информационного временного резерва на основе данных о реальных сбоях и примененном корректирующем воздействии.
- Имитационное моделирование различных сценариев отказов для оценки эффективности предлагаемых стратегий.

Разработка и реализация предложенных подходов позволит повысить устойчивость и безопасность управления железнодорожными перевозками, сократить задержки поездов и оптимизировать затраты на эксплуатацию инфраструктуры.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении будет способствовать созданию систем диспетчерского управления железнодорожным транспортом с максимально высокой степенью автоматизации функций выбора рационального решения при самых различных, в том числе нештатных, сценариях перевозочного процесса, включая формирование планов действий с учетом искусственного интеллекта. ▲

Список источников

1. Розенберг Е. Н. Центры управления перевозками: эволюция и целевое состояние / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, Н. О. Бересток // Наука и технологии железных дорог. — 2021. — Т. 5. — № 3(19). — С. 9–14.
2. Озеров А. В. Технологии обеспечения функциональной безопасности и надежности железнодорожных систем управления / А. В. Озеров, И. Б. Шубинский // Комплексное взаимодействие лингвистических и выпускающих кафедр в техническом вузе: международная научно-практическая конференция, посвященная 125-летию РУТ (МИИТ), Москва, 27 мая 2021 года. — М.: Российский университет транспорта, 2021. — С. 259–264.
3. Долгий А. И. Облачные технологии для ответственных систем железнодорожного транспорта / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров // Железнодорожный транспорт. — 2023. — № 11. — С. 20–25.
4. Озеров А. В. О построении модели безопасности сложной автоматической системы транспортного обслуживания / А. В. Озеров, А. М. Ольшанский // Надежность. — 2021. — Т. 21. — № 2. — С. 31–37. — DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-31-37.
5. Шубинский И. Б. Структурная надежность информационных систем: методы анализа / И. Б. Шубинский. — М.: ООО «Журнал “Надежность”», 2012. — 216 с. — DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-145.
6. Марон А. И. Оптимизация управления процессами внедрения и обслуживания крупномасштабных информационных систем / А. И. Марон. — М.: ННРИУиЭ, 2008. — 80 с.
7. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. — М.: Мир, 1966. — 288 с.
8. Breiman L. The Poisson tendency in traffic distribution / L. Breiman // Annals of Mathematical Statistics. — 1963. — Vol. 34. — Iss. 1. — Pp. 308–311.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — 1184 с.
10. Ольшанский А. М. Некоторые аспекты функционирования крупных вертикально интегрированных систем / А. М. Ольшанский, Н. В. Кондрахина // Железнодорожный транспорт на современном этапе. 70 лет аспирантуре ОАО ВНИИЖТ: сборник трудов ученых ОАО ВНИИЖТ / под ред. Б. М. Лапидуса, Г. В. Гогричиани. — М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2014. — С. 52–56. — DOI: 10.30917/ATTPRINT-2018-4.
11. Черкесов Г. Н. Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем / Г. Н. Черкесов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2011. — № 6-1. — С. 136–153. — DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219.
12. Шень А. Х. Колмогоровская сложность и математическая случайность / А. Х. Шень, Н. К. Верещагин, В. А. Успенский. — М.: МЦНМО, 2014. — 576 с.
13. Шубинский И. Б. Адаптивная гарантоспособность информационных систем управления / И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев, Л. Р. Папич // Надежность. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 3–9. — DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-3-9.

14. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. — М.: Журнал «Надежность», 2016. — 545 с. — DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-97-101.
15. Шубинский И. Б. Функциональная надежность программного обеспечения информационных систем /

- И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев, Г. Б. Прошин // Надежность. — 2011. — № 3(38). — С. 72–81.
16. Шубинский И. Б. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 320 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 303–312

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-303-312

Rational Strategy for the Rehabilitation of Polygonal Automated Control Systems

Information about authors

Dolgiy A. I., PhD in Engineering, Director General. E-mail: a.dolgiy@vnias.ru

Rozenberg E. N., Doctor of Engineering, First Deputy Director General.

E-mail: info@vnias.ru

Olshanskiy A. M., PhD in Engineering, Center for Mathematical, Computer Modelling and Cognitive Research. E-mail: a.olshanskiy@vnias.ru

Ozerov A. V., International Department — Intellectual Property Management Centre. E-mail: a.ozerov@vnias.ru

Abstract: This paper focuses on the challenges associated with managing the transportation processes within contemporary railways in the context of growing integration of digital technologies. Despite a significant degree of automation in data collection and routine operations, the responsibility for making critical decisions during failures and non-standard situations continues to rely on the expertise of dispatchers, as there are currently no universal models to guide these scenarios. The study explores emerging trends in the development of railway operation control centres, including advancements in cloud computing, AI-driven adaptive planning, and system integration. It also highlights the lack of formalized failure management protocols in large railway networks and proposes a comprehensive assessment model for responding to failure scenarios, ranging from normal operations to various forms of disruptions and delays. Additionally, the paper investigates the concept of information time reserve in the rehabilitation of railway operation control systems.

Keywords: event graph; artificial neural networks; Markov model; transportation process; operating domain; railway operation centre; automation and remote control on railways.

References

1. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Berestok N. O. Tsentry upravleniya perevozkami: evolyutsiya i tselevoye sostoyaniye [Centers of transportation management: evolution and target state]. *Nauka i tekhnologii zheleznnykh dorog* [Science and technologies of railways]. 2021, vol. 5, Iss. 3(19), pp. 9–14. (In Russian)
2. Ozerov A. V., Shubinskiy I. B. Tekhnologii obespecheniya funktsional'noy bezopasnosti i nadezhnosti zheleznodorozhnykh sistem upravleniya [Technologies for ensuring functional safety and reliability of railway control systems]. *Kompleksnoe vzaimodeystvie lingvisticheskikh i vypuskayushchikh kafedr v tekhnicheskoy vuzye: mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 125-letiyu RUT (MIIT), Moskva, 27 maya 2021 goda* [Complex interaction of linguistic and graduating departments in a technical university: international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of RUT (MIIT), Moscow, May 27, 2021]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2021, pp. 259–264. (In Russian)
3. Dolgiy A. I., Rozenberg E. N., Ozerov A. V. Oblachnye tekhnologii dlya otvetstvennykh sistem zheleznodorozhnogo transporta [Cloud technologies for critical systems of railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2023, Iss. 11, pp. 20–25. (In Russian)

4. Ozerov A. V., Ol'shanskiy A. M. O postroenii modeli bezopasnosti slozhnoy avtomaticheskoy sistemy transportnogo obsluzhivaniya [On building a safety model for a complex automatic transportation service system]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2021, vol. 21, Iss. 2, pp. 31–37. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-31-37. (In Russian)
5. Shubinskiy I. B. *Strukturnaya nadezhnost' informatsionnykh sistem: metody analiza* [Structural reliability of information systems: analysis methods]. Moscow: OOO "Zhurnal "Nadezhnost'", 2012, 216 p. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-145. (In Russian)
6. Maron A. I. *Optimizatsiya upravleniya protsessami vnedreniya i obsluzhivaniya krupnomasshtabnykh informatsionnykh sistem* [Optimization of management of implementation and maintenance processes for large-scale information systems]. Moscow: NNRIUE Publ., 2008, 80 p. (In Russian)
7. Kheyty F. *Matematicheskaya teoriya transportnykh potokov* [Mathematical theory of traffic flows]. Moscow: Mir Publ., 1966, 288 p. (In Russian)
8. Breiman L. The Poisson tendency in traffic distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, vol. 34, Iss. 1, pp. 308–311.
9. Khaykin S. *Neironnyye seti: polnyy kurs* [Neural networks: a comprehensive course]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams Publ., 2006, 1184 p. (In Russian)
10. Ol'shanskiy A. M., Kondrakhina N. V. Nekotorye aspekty funktsionirovaniya krupnykh vertikal'no integrirovannykh sistem [Some aspects of functioning of large vertically integrated systems]. *Zheleznodorozhnyy transport na sovremennom etape. 70 let aspirantury OAO VNIIZhT: sbornik trudov uchenykh OAO VNIIZhT* [Railway transport at the present stage. 70 years of postgraduate studies at JSC VNIIZhT: collection of works by scientists of JSC VNIIZhT]. Ed. by B. M. Lapidus, G. V. Gogrichiani. Moscow: OAO "VNIIZhT", 2014, pp. 52–56. DOI: 10.30917/ATT-PRINT-2018-4. (In Russian)
11. Cherkasov G. N. Problema ZIP i zadacha formirovaniya novogo razdela teorii nadezhnosti vosstanavlivaemykh sistem [The ZIP problem and the task of forming a new section of the theory of reliability of recoverable systems]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Informatics. Telecommunications. Management]. 2011, Iss. 6-1, pp. 136–153. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219. (In Russian)
12. Shen' A. Kh., Vereshchagin N. K., Uspenskiy V. A. *Kolmogorovskaya slozhnost' i matematicheskaya sluchaynost'* [Kolmogorov complexity and mathematical randomness]. Moscow: MTsNMO Publ., 2014, 576 pp. (In Russian)
13. Shubinskiy I. B., Zamyshlyayev A. M., Papich L. R. Adaptivnaya garantospobnost' informatsionnykh sistem upravleniya [Adaptive guarantee capability of information management systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2018, vol. 18, Iss. 4, pp. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-3-9. (In Russian)
14. Shubinskiy I. B. *Nadezhnye otkazoustoychivye informatsionnye sistemy. Metody sinteza* [Reliable fault-tolerant information systems. Synthesis methods]. Moscow: Zhurnal "Nadezhnost'" Publ., 2016, 545 p. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-97-101. (In Russian)
15. Shubinskiy I. B., Zamyshlyayev A. M., Proshin G. B. Funktsional'naya nadezhnost' programmnoy obespecheniya informatsionnykh sistem [Functional reliability of software for information systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2011, Iss. 3(38), pp. 72–81. (In Russian)
16. Shubinskiy I. B., Rozenberg E. N. *Funktsional'naya bezopasnost' sistem upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Functional safety of control systems in railway transport]. Vologda: Infra-Inzheneriya Publ., 2023, 320 p. (In Russian)

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

КУЛАГИН Максим Алексеевич, канд. техн. наук, доцент¹; e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

ЯНЧЕНКО Герман Олегович, аспирант¹; e-mail: ya@gyanchenko.ru

РОДИНА Дарья Михайловна, ведущий разработчик²; e-mail: dk.957@ya.ru

ПОЛЕГЕНЬКО Алексей Иванович, студент¹; e-mail: screen.polegenko@mail.ru

¹Кафедра «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва

²ПАО «ВТБ», Москва

В условиях активного внедрения интеллектуальных систем в железнодорожную отрасль возрастает значимость обеспечения их робастности к внешнему вмешательству, в том числе в форме скрытых атак на входные данные. Статья посвящена исследованию робастности современных архитектур нейронных сетей (*ResNet18*, *ResNet50*, *Vision Transformer (ViT)*), сверточной нейронной сети и мультимодальной *GPT-4o*), применяемых для автоматического обнаружения дефектов на изображениях элементов железнодорожной инфраструктуры. Проведены эксперименты с генерацией скрытых возмущений с помощью универсального шума, созданного на базе ансамбля трансформеров. Рассмотрены две модификации атак (M1 и M2), позволяющие смоделировать реалистичные сценарии вмешательства в условиях ограниченного доступа к данным. Оценка качества моделей выполнялась как на «чистых» изображениях, так и в условиях добавленного шума. Результаты показывают, что, несмотря на высокую точность *ResNet50* на исходных данных, наибольшую робастность к возмущениям демонстрируют *ViT* и *GPT-4o*. Сделаны выводы о целесообразности выбора архитектуры не только по точности, но и по уровню робастности к шуму. Работа предлагает методику оценки робастности и практические рекомендации для разработки систем компьютерного зрения, предназначенных для эксплуатации в критически важных условиях железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: интеллектуальные системы; железнодорожный транспорт; состязательные атаки; робастность; нейронные сети; компьютерное зрение; безопасность; мониторинг инфраструктуры.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-313-326

▼ Введение

В настоящее время интеллектуальные системы внедряются в различные процессы на железнодорожном транспорте, например для мониторинга состояния путей, управления движением и обеспечения безопасности [1–3].

В рамках данного исследования рассматриваются интеллектуальные транспортные системы (ИТС), которые используют техническое зрение. Требования к системам технического зрения (СТЗ) зависят от функций, которые эти системы выполняют, и задач, которые они решают.

В современных ИТС ключевую роль играют СТЗ в реализации беспилотного управления, особенно на железнодорожном транспорте.

СТЗ используются для обнаружения препятствий на пути следования поезда, оценки обстановки и принятия решений в режиме реального времени без участия машиниста [4]. Критически важным требованием для таких беспилотных систем является способность видеть дальше и реагировать быстрее человека-машиниста [5]. При обнаружении опасного объекта современные системы могут не только предупредить оператора, но и автоматически задействовать тормоза без вмешательства человека. Все это делает техническое зрение базовым элементом обеспечения безопасности движения в будущих беспилотных поездах.

В условиях, когда полностью автономное управление еще не реализовано, СТЗ

используются для помощи машинисту и повышения уровня осведомленности о ситуации человека-оператора. Такие системы функционируют как электронный помощник машиниста: камеры, установленные на подвижном составе, непрерывно наблюдают путь, а нейронная сеть в бортовом вычислительном модуле анализирует видеопоток для поиска препятствий. Примером является бортовая система технического зрения, внедряемая на локомотивах РЖД [6, 7]. Она распознает на пути людей, животных, автомобили, другую технику, а также объекты железнодорожной инфраструктуры (сигналы светофоров, стрелки, тупиковые упоры и т. д.), которые могут представлять опасность для движения. Основная задача таких систем — предотвратить проезд на запрещающий сигнал, столкновения с преградами и иные инциденты, повышая безопасность движения на станциях и перегонах.

Отдельным направлением применения компьютерного зрения на транспорте являются задачи диагностики и мониторинга состояния инфраструктуры и подвижного состава. Здесь можно выделить системы, работающие в реальном времени, и системы, работающие в отсроченном режиме. В одном случае СТЗ интегрируется непосредственно в эксплуатационный процесс: обнаружение критических дефектов или отклонений сразу генерируют сигналы тревоги, позволяя немедленно принять меры. Например, с помощью панорамных видеокамер высокого разрешения выполняют автоматическое распознавание номеров вагонов, мониторинг температуры, визуализацию пантографа [8]. Такие СТЗ позволяют заблаговременно выявлять проблемы в состоянии подвижного состава до его прибытия в парк. С другой стороны, многие диагностические СТЗ действуют в режиме, близком к реальному времени, но все же предполагают анализ данных после их сбора. Например, система автоматического выявления дефектов рельс и стрелочных переводов, которая повышает безопасность и эффективность эксплуатации железных дорог [9]. В работе с использованием нейронных сетей удалось автоматически выявить изъяны железнодорожных путей, достигнув точности порядка 80–82 %.

В результате анализа источников литературы можно существующие СТЗ, применяемые на железнодорожном транспорте, классифицировать по нескольким ключевым признакам в зависимости от их назначения и условий работы:

1. По временному режиму функционирования:

- системы реального времени;
- системы, работающие в отложенном режиме.

2. По степени автоматизации и роли человека:

- полностью автономные;
- частично автоматизированные;
- информационно-мониторинговые.

3. По функциональному назначению:

- системы обеспечения безопасности движения включают в себя подсистемы обнаружения препятствий на пути, распознавания сигналов светофоров и знаков, а также системы обнаружения несанкционированного проникновения на пути;
- системы технической диагностики и обслуживания нацелены на обнаружение физических дефектов и отказов — сюда относятся комплексы мониторинга состояния железнодорожного пути, а также системы проверки подвижного состава во время движения поезда или на станциях;
- системы контроля состояния персонала и соблюдения регламента — например, камеры, следящие за бодрствованием и концентрацией машиниста (предупреждение засыпания, состояние опьянения) [10].

4. По месту установки и охвату обзора камер и датчиков:

- подвижной состав;
- элементы инфраструктуры;
- мобильные платформы (например, дроны, роботы или носимые устройства).

В критически важных задачах применения СТЗ возрастает внимание к вопросам их защищенности от потенциальных угроз. Незначительные визуальные модификации, незаметные для человека, могут привести к ошибочной классификации со стороны модели [11], что в условиях железнодорожного транспорта может иметь серьезные последствия для безопасности движения. Эти модификации могут

быть внесены преднамеренно в форме состязательных атак [12], что требует исследований в области оценки робастности моделей к подобным воздействиям. В статистическом смысле [13] робастность означает нечувствительность к малым отклонениям от предположений. В данной статье робастность модели определяется в контексте машинного обучения [11], что означает способность модели сохранять качество прогнозирования при воздействии возмущений на входные данные, включая шум и целенаправленные состязательные атаки. В данном исследовании под шумом понимается случайное, статистически описываемое отклонение яркости/цвета пикселей, не имеющее структуры.

СТЗ без специальных мер защиты уязвимы к скрытому вмешательству. В ответ на такую угрозу разрабатываются различные методы защиты моделей:

- фильтрация входных данных [14];
- детектирование аномалий [15];
- обучение с учетом возмущений (состязательное обучение) [16].

Одним из методов защиты моделей считается состязательное обучение, при котором в процесс тренировки включаются состязательные примеры. Реализация состязательного дообучения заметно повышает стабильность моделей искусственного интеллекта без потери точности. В работе [17] авторы показали, что модель классификации состояния инфраструктуры для высокоскоростных поездов, обученная на видеоданных, демонстрировала высокое качество работы при обработке незашумленных изображений, однако проявила сильное снижение качества (то есть оказалась уязвима к атакам) при добавлении к кадрам небольших изменений методом BIM [18]. BIM (Basic Iterative Method) — это итерационный вариант атаки FGSM (Fast Gradient Sign Method) [19], при котором к изображению многократно добавляют небольшие порции возмущения, вычисляемого по градиенту потерь модели, чтобы заставить модель ошибаться.

В работах [20, 21] рассматриваются состязательные атаки на системы машинного зрения и методы защиты от них. Анализируются уязвимости современных моделей ИИ,

и обобщаются результаты исследований по повышению их робастности, включая состязательное обучение, фильтрацию и реконструкцию входных данных, а также архитектурные решения для снижения чувствительности к шуму. В [22] анализируются методы борьбы с шумом на изображениях в части обнаружения скрытой информации. Авторы предлагают улучшить метод комплексного стегоанализа путем учета качественных характеристик изображений (резкости, размытости, шума, контраста и энтропии) наряду с классическими стегоаналитическими методами.

Данные обзоры обобщают подходы по защите моделей ИИ от помех и злонамеренных воздействий, что актуально для железнодорожных интеллектуальных систем. На сегодняшний день не существует универсального решения, гарантирующего полную защиту нейронных сетей от всех видов атак. Каждая оборонительная мера имеет ограничения, и злоумышленники продолжают находить новые способы обхода защит. Таким образом, проблема обеспечения безопасности ИТС железнодорожного транспорта при скрытом внешнем воздействии остается актуальной и требует дальнейшего исследования.

В данной статье для оценки робастности моделей ИИ рассматривается задача определения дефектов в состоянии инфраструктуры по изображениям. В работе [23] предложена модифицированная глубокая сверточная нейронная сеть для автоматического распознавания и классификации дефектов рельсовых стыков по видеоизображениям, полученным вагоном-путеизмерителем. Авторы применили метод переноса обучения и расширили обучающие данные с помощью искусственных аффинных преобразований изображений, чтобы повысить стабильность работы классификатора к различным положениям стыков. В статье [24] исследовано качество работы нейронной сети (YOLOv8), решающей задачу детектирования объектов железнодорожной инфраструктуры в реальном времени. Модель обучена на большом наборе данных (более 20 000 изображений) и протестирована на различных конфигурациях (разные разрешения входных изображений). Результаты показали высокую робастность алгоритма

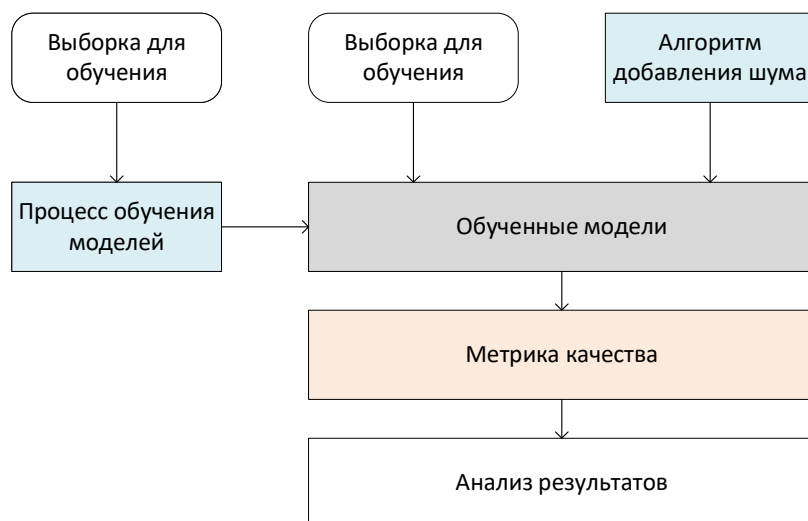


Рис. 1. Обобщенная схема эксперимента

YOLOv8 к изменениям условий среды — модель обнаруживает элементы пути при различном окружении и шуме. Использование специального аппаратного графического ускорителя существенно повысило скорость обработки, что имеет значение для мониторинга инфраструктуры в режиме реального времени.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование робастности различных нейросетевых архитектур, используемых для автоматического обнаружения дефектов железнодорожной инфраструктуры, в условиях скрытого вмешательства, моделируемого с помощью «зашумления» изображений.

Решаются следующие задачи:

- создание и обучение моделей для обнаружения дефектов рельсов по изображению;
- создание алгоритмов добавления помех на изображения;
- оценка качества разработанных моделей на «чистых» и «зашумленных» изображениях;
- анализ архитектур моделей в условиях помех.

Схема эксперимента иллюстрирует процесс оценки робастности моделей ИИ к шуму (рис. 1).

1. Используемые модели обнаружения дефектов рельсов по изображению

Даны обучающий $D^{train} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ и тестовый

$D^{test} = \{(x_j^{test}, y_j^{test})\}_{j=1}^M$ наборы данных,

в которых $x_i, x_j^{test} \in R^{H \times W \times 3}$ — изображения

участка рельсового пути, где $H \times W \times 3$ — это высота, ширина и количество каналов в RGB-изображении, $y_i, y_j^{test} \in \{0, 1\}$ — метка, N, M — количество изображений в обучающем и тестовом наборе данных соответственно. Количество изображений с дефектами ($y_i = 1$) и без дефектов ($y_i = 0$) одинаковое (рис. 2).

Требуется построить параметризованную модель $f_\theta: R^{H \times W \times 3} \rightarrow \{0, 1\}$, которая аппроксимирует апостериорное распределение $P(y=1|x)$. Подбор параметров модели производится с использованием алгоритма градиентного спуска [26]. Суть данного алгоритма заключается в итеративном обновлении параметров θ в направлении, противоположном градиенту $L(\theta)$ функции потерь. На каждой итерации вычисляется градиент функции потерь по параметрам модели $\nabla_\theta L(\theta)$, после чего параметры обновляются по правилу:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \eta \nabla_\theta L(\theta_t), \quad (1)$$

где t — итерация обучения модели;

$\eta > 0$ — скорость обучения, определяющая величину шага.

Таким образом, модель последовательно уточняет свои параметры, стремясь минимизировать выбранную функцию ошибки. В качестве оптимизируемой функции ошибки используется бинарная кросс-энтропия:

$$L(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i)], \quad (2)$$



Рис. 2. Примеры изображений из набора данных (в верхнем ряду с дефектами, а в нижнем — без дефектов). Набор данных взят из [25]

где p_i — прогноз обученной модели. После решения задачи оптимизации получаются параметры $\hat{\theta}$ и обученная модель $\hat{f}(x) = f_{\hat{\theta}}(x)$.

В рамках исследования были задействованы пять различных архитектур нейронных сетей, охватывающих как сверточные, так и модели трансформеров. Это позволило провести сравнительный анализ робастности моделей различных классов к скрытым помехам.

1. Модель семейства *Vision Transformer*, *ViT-B/16*, разбивающая входное изображение на фрагменты размером 16×16 пикселей и обрабатывающая их с помощью механизма внимания. Обеспечивает баланс между вычислительной сложностью и качеством классификации.

2. Классические сверточные архитектуры с остаточными связями [27]. *ResNet18* представляет собой компактную модель, состоящую из 18 слоев, а *ResNet50* — более глубокую, с 50 слоями, обеспечивающую высокую точность при наличии достаточного количества обучающих данных. Обе модели использовались с предварительно обученными весами (*ImageNet*) и дообучались на целевом датасете.

3. Мультимодальная модель *GPT-4o*, способная обрабатывать как текстовые, так и визуальные входные данные. В рамках эксперимента использовалась для классификации изображений

с использованием *prompt*-инжиниринга, без дополнительного дообучения модели.

4. Сверточная нейронная сеть (*CNN*). Архитектура предлагаемой нейронной сети представляет собой *CNN*, ориентированную на задачу бинарной классификации изображений. Модель состоит из четырех сверточных блоков, каждый из которых включает в себя последовательность из свертки с ядром 3×3 , нормализации по батчу (*BatchNorm2d*) и функции активации *ReLU*, за которой следует операция подвыборки (*MaxPooling2d*) для первых трех блоков и адаптивное усреднение (*AdaptiveAvgPool2d*) в последнем блоке. Последовательно увеличивается количество фильтров от 32 до 256, что позволяет эффективно извлекать признаки различной степени абстракции. После экстракции признаков из изображения выходное тензорное представление проходит через слой выравнивания (*Flatten*) и линейный полносвязный слой, преобразующий 256 признаков в скалярное значение, на которое накладывается сигмоид-функция. Это позволяет интерпретировать выход как вероятность принадлежности к положительному классу. Архитектура сбалансирована по глубине и числу параметров, обеспечивая хорошее соотношение между вычислительной эффективностью и качеством классификации.

2. Алгоритм добавления помех на изображения

В D^{test} для каждого x_j^{test} создается модифицированная версия $\tilde{x}_j$:

$$\tilde{x}_j = x_j^{test} + \delta_j, \quad (3)$$

где δ_j — вектор шума, который создается по алгоритму, рассмотренному ниже.

Основная задача в рамках данного исследования заключается в оценке робастности нейронных сетей различной архитектуры, решающих задачу бинарной классификации. Робастность рассчитывается по следующей формуле:

$$R_p = 1 - \frac{\|\Delta Q\|_p}{\|Q^{clean}\|_p}, \quad (4)$$

где Q^{clean} — набор метрик качества на тестовых данных;

$\Delta Q = Q^{clean} - Q^{noisy}$ — показывающий ухудшение модели;

p — векторная норма, в рамках данного исследования была выбрана Евклидова норма $p = 2$. В данном случае чем ближе R_p к 1, тем стабильнее работает модель при наличии возмущений в данных.

В рамках настоящего исследования особое внимание уделяется анализу робастности моделей классификации к скрытому вмешательству в исходные данные. Для имитации возможных атак на систему мониторинга рельсового пути, в частности — скрытых модификаций изображений, используется метод генерации состязательных примеров.

Суть метода заключается в последовательной адаптации входного изображения таким образом, чтобы минимальные и визуально неразличимые изменения вызывали существенные сдвиги в выходных предсказаниях модели. Генерация осуществляется с использованием ансамбля суррогатных моделей и стохастических преобразований, что позволяет добиться переносимости атаки на разные архитектуры классификаторов.

В отличие от классических атак типа *FGSM*, используемый подход формирует возмущение, приближая выходное изображение к целевому изображению с использованием процесса добавления шума (рис. 3). В качестве функции расчет расстояния между двумя векторами, сформированными на выходе ансамбля моделей — текущего «зашумленного» $\tilde{x}_k^{sou}$ и целевого $\tilde{x}_k^{tar}$ изображений, выступает косинусное расстояние $\mathcal{L}\left(f\left(\tilde{x}_k^{sou}\right), f\left(\tilde{x}_k^{tar}\right)\right)$. Косинусное расстояние для сравнения векторов эмбедингов (скрытых признаков) исходного и зашумленного изображений рассчитывается по формуле:

$$d(u, v) = 1 - \frac{u \cdot v}{\|u\|_2 \|v\|_2}, \quad (5)$$

где $u \cdot v$ — скалярное произведение векторов локальных и глобальных эмбедингов;

$\|u\|_2 \|v\|_2$ — евклидовы нормы векторов.

Ансамбль моделей в исследовании использует три предварительно обученные архитектуры из семейства *Vision Transformer (ViT)* [25] ($m = 3$), каждая из которых реализована с различными конфигурациями параметров:

- ViT-B/16 — базовая модель, использующая разбиение входного изображения на непересекающиеся фрагменты размером 16×16 пикселей (patch embeddings), что обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и качеством извлечения признаков;
- ViT-B/32 — облегченная версия с размером фрагмента 32×32 пикселя, обладающая пониженной чувствительностью к локальным шумам за счет более грубого представления;
- ViT-g-14 — крупномасштабная архитектура, использующая фрагменты размером 14×14 пикселей и высокоразмерные векторы признаков, что способствует повышенной обобщающей способности и точности при обработке сложных входных данных.

Алгоритм 1. Алгоритм добавления шума

Вход: $x^{clean}, x^{tar}, n, \alpha, \epsilon, m$

Выход: x^{noisy}

$x_0^{sou} \leftarrow x^{clean}; \delta_0 \leftarrow 0$

for $k \leftarrow 0$ to $n - 1$ do

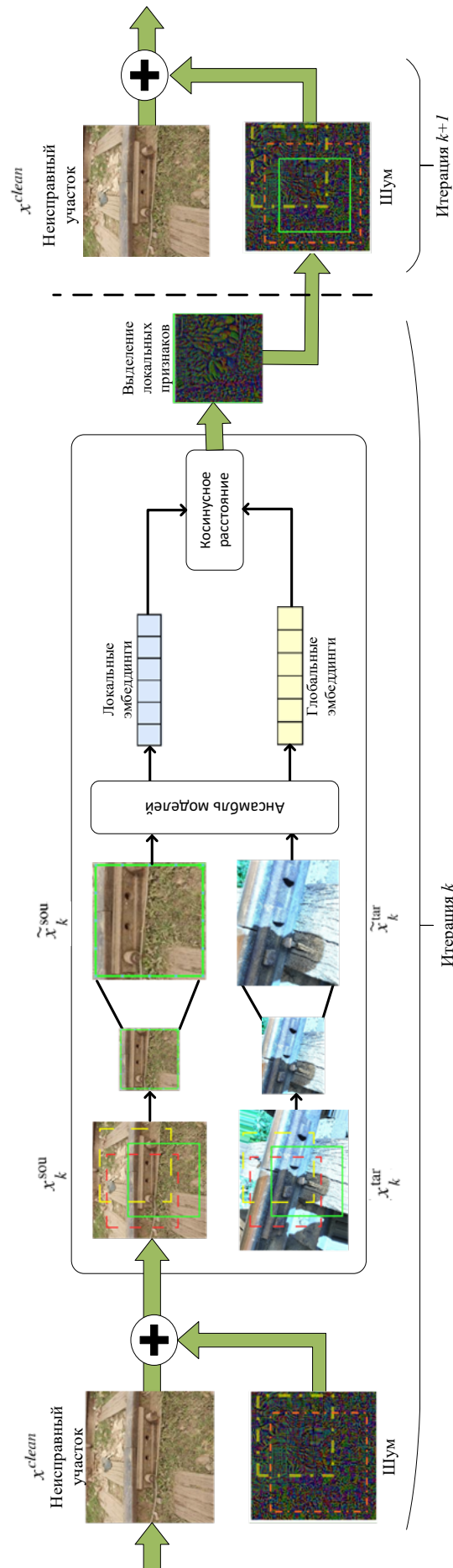


Рис. 3. Процесс добавления шума на изображения

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_k^{sou} &\leftarrow \mathcal{F}_s(x_k^{sou}), \quad \tilde{x}_k^{tar} \leftarrow \mathcal{F}_s(x_k^{tar}); \\
L &\leftarrow \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m L(f(\tilde{x}_k^{sou}), f(\tilde{x}_k^{tar})); \\
g_k &\leftarrow \frac{1}{m} \nabla_{\tilde{x}_k^{sou}} \sum_{j=1}^m L(f(\tilde{x}_k^{sou}), f(\tilde{x}_k^{tar})); \\
\delta_{k+1} &\leftarrow \text{Clip}(\delta_k + \alpha \cdot \text{sign}(g_k), -\epsilon, \epsilon); \\
x_k^{sou} &\leftarrow \tilde{x}_k^{sou} + \delta_{k+1}; \\
\text{end for} \\
x_n^{noisy} &\leftarrow x_n^{sou},
\end{aligned}$$

где x^{clean} — исходное «чистое» изображение неисправного участка пути (оригинал без вмешательств);

x_k^{sou} — «зашумленное» на k -й итерации изображение;

x_k^{tar} — изображение, к которому подбирается шум, чтобы минимизировать различия признаков на k -й итерации;

$\tilde{x}_k^{sou}$ — фрагменты «зашумления» на k -й итерации изображение;

$\tilde{x}_k^{tar}$ — фрагменты целевого изображения на k -й итерации.

В данном исследовании рассматривается две модификации Алгоритма-1.

Модификация-1 (M1) заключается в создании одного универсального шума δ_k , который вычисляется с использованием градиентов по всем изображениям. Смысл M1 заключается в том, что для каждого изображения с классом $y_i = 1$ добавляется один универсальный шум, который вычисляется по аналогии с шагом 2 в A1, для всех примеров, в которых $y_i = 0$.

Модификация-2 (M2) заключается в создании одного универсального шума δ_k , который вычисляется как среднее значение шума, вычисленного по всем изображениям. Для каждого изображения с классом $y_i = 1$ добавляется один универсальный шум, который вычисляется по аналогии с шагом 2 в A1, для каждого примера в отдельности с $y_i = 0$. Затем шум усредняется по всем примерам.

В M1 и M2 возмущение создается однократно и используется многократно, что делает его приближенным к реальным сценариям атак, когда злоумышленник имеет ограниченный доступ к данным (рис. 4).

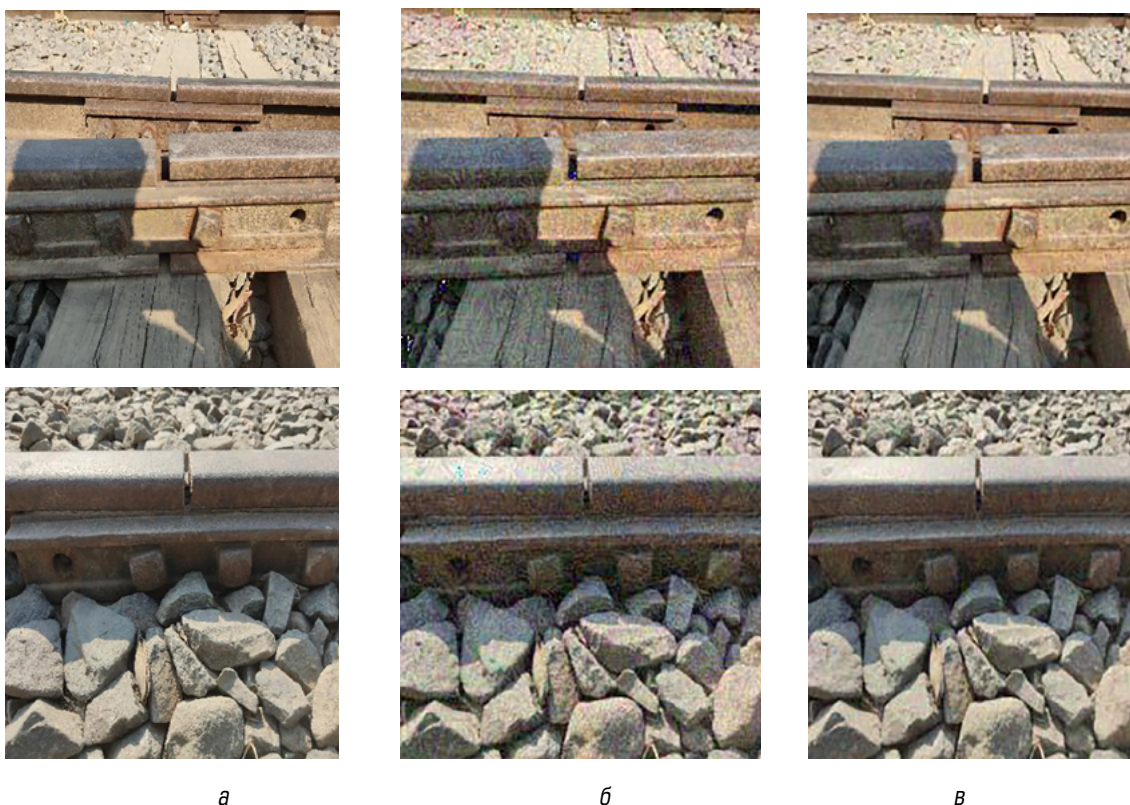


Рис. 4. Результат работы алгоритма добавления шума:

а — исходное изображение; б — шум, наложенный с использованием алгоритма и модификацией M1;

в — шум, наложенный с использованием алгоритма и модификацией M2. Набор данных из [25]

3. Оценка качества разработанных моделей на «чистых» и на «зашумленных» изображениях

Оценка качества модели производится по группе метрик $Q \in R^6$. Каждый элемент Q — это одна метрика, которая лежит в диапазоне от 0 до 1. В рамках данного исследования использовался следующий набор из 6 метрик для оценки бинарного классификатора [28]: *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *F1-score*, *ROC AUC*, *PR AUC*.

Accuracy — доля правильно классифицированных объектов среди всех;

Precision — доля верных положительных предсказаний среди всех положительных предсказаний модели;

Recall — доля верно найденных положительных случаев среди всех реально положительных случаев;

F1-score — сбалансированная оценка, объединяющая *Precision* и *Recall*;

ROC AUC — способность модели различать положительный и отрицательный классы, основываясь на площади под ROC-кривой;

PR AUC — это показатель качества модели, определяемый по площади под кривой Precision-Recall; он особенно важен при работе с несбалансированными данными.

Оценка качества производилась по обученной модели $\hat{f}$, которая предсказывала вероятность события $y_i = 1$, а затем бинаризовалась $\hat{y}_j = I[\hat{f}(x_j) \geq \tau]$, где τ — порог бинаризации.

Для оценки базовой точности классификации в условиях отсутствия помех был проведен эксперимент, в котором все модели тестировались на исходных изображениях без наложения скрытых возмущений. Результаты сравнения представлены на рис. 5. Из диаграмм видно, что на «чистых» данных наибольшую точность (*Accuracy*) и обобщающую способность (*F1-score*, *ROC AUC*, *PR AUC*) демонстрирует модель *ResNet-50*, за ней следуют *ResNet-18* и кастомная *CNN*. Модель *ViT-B/16* также показала стабильные показатели, особенно по метрике *Precision*, но уступила *ResNet-50* по *F1-score* и *Recall*.

Эти результаты указывают на то, что глубокие сверточные архитектуры с предобученными весами (такие как *ResNet-50*) способны эффективно классифицировать дефекты железнодорожных креплений при наличии ограниченного обучающего набора. Полученные значения метрик служат отправной точкой для последующего анализа робастности моделей к скрытым вмешательствам, представленного на рис. 6.

Проведем сравнение эффективности различных моделей при воздействии скрытых

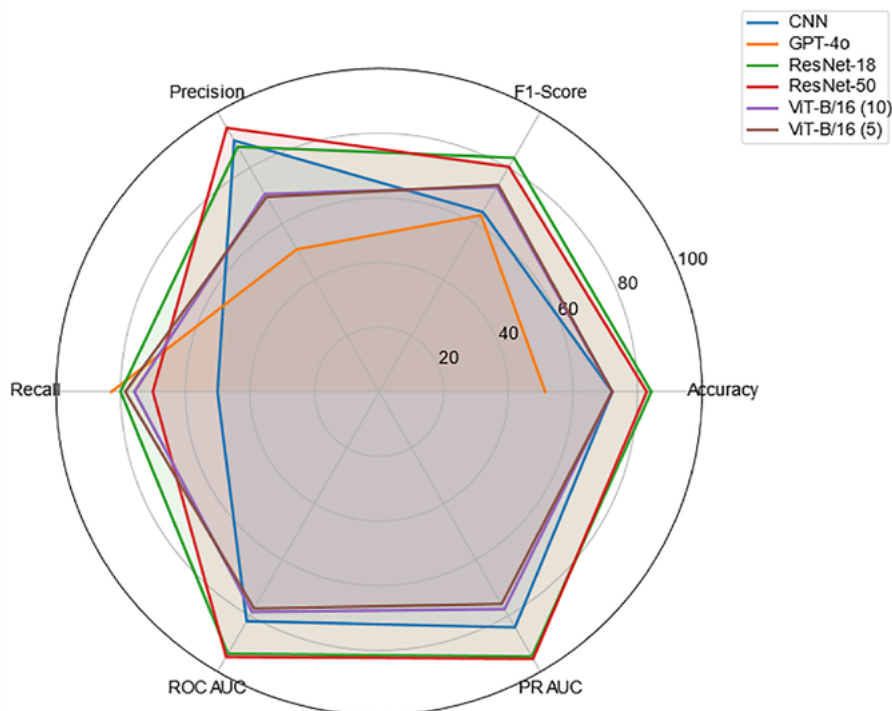


Рис. 5. Результаты работы моделей на «чистых» данных

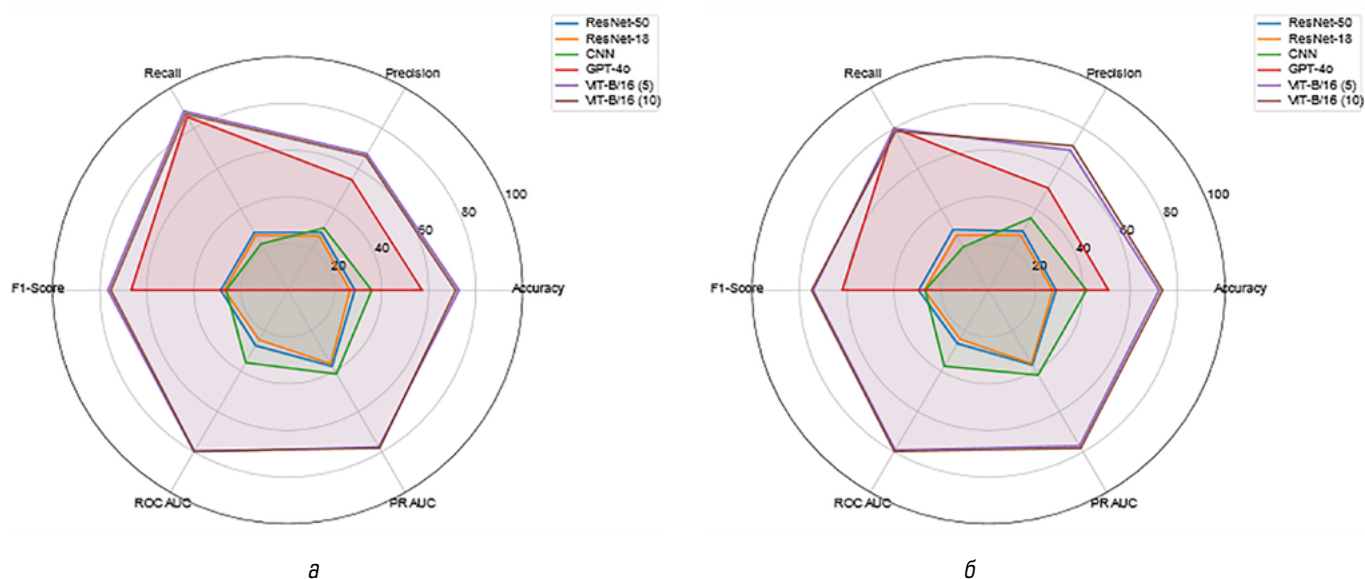


Рис. 6. Результаты работы моделей при наличии шума для сценариев:
а — M1; б — M2

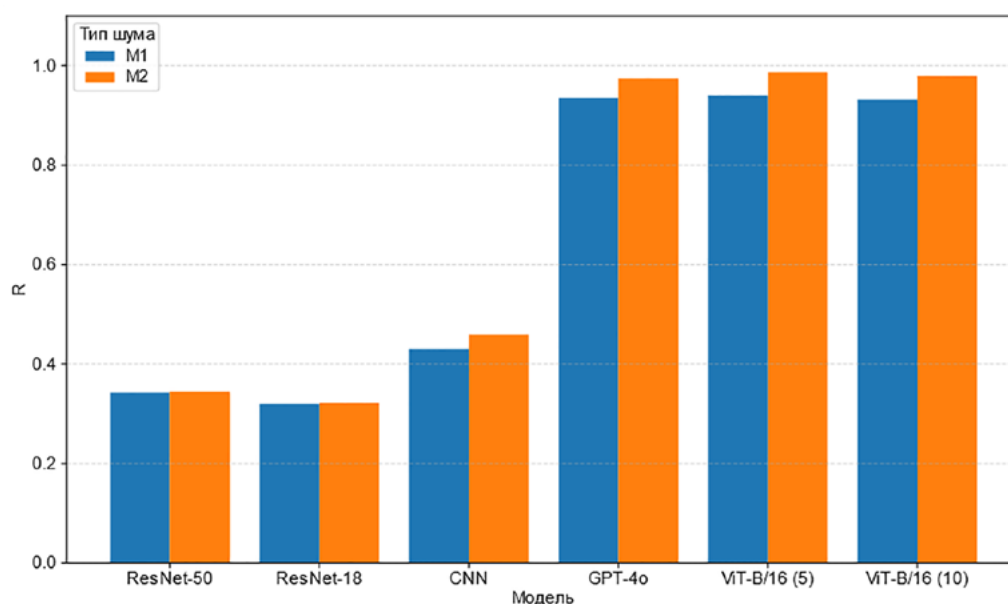


Рис. 7. Сравнение робастности моделей

возмущений, сгенерированных по двум сценариям: M1 и M2. Результаты показывают, что добавление шума существенно снижает значения всех ключевых метрик. Наименее чувствительными оказались модели *ViT-B/16* и *GPT-4o*. Таким образом, можно сделать вывод, что выбор архитектуры существенно влияет на робастность модели. Применение *ResNet*-архитектур с предварительным обучением делает их менее подверженными внешним воздействиям, что особенно важно для критических задач транспортной инфраструктуры.

Отсутствие значения метрик *ROC AUC* и *PR AUC* для *GPT-4o* связано с тем, что *GPT-4o* выдает на выходе 0 или 1.

4. Анализ архитектур моделей на предмет робастности в условиях помех

На графике (рис. 7) представлено сравнение робастности различных моделей (*ResNet18*, *ResNet50*, *GPT-4o*, *ViT* и *CNN*). Чем выше значение *R*, тем менее чувствительна модель к шуму во входных данных.

Как видно, модель *ViT* и *GPT-4o* демонстрирует высокую робастность, тогда как *CNN*, *ResNet18* и *ResNet50* показывают более заметное снижение качества при наличии шума. Такие результаты подтверждают потенциал *Vision Transformer*-архитектур в задачах, требующих надежности при «зашумлении» входных изображений.

Проведенный анализ показал, что:

- на «чистых» данных наилучшую точность демонстрируют глубокие сверточные модели *ResNet-50*;
- при добавлении шума модели на основе *Vision Transformer (ViT-B/16)* и *GPT-4o* проявляют наибольшую робастность к шуму;
- предложенные модификации универсального шума M1 и M2 позволяют эффективно моделировать реалистичные атаки без необходимости доступа к конкретным данным модели;
- использование архитектур, демонстрирующих высокую робастность, критически важно при разработке ИИ-систем, применяемых в условиях эксплуатации железнодорожного транспорта.

Заключение

В условиях активного внедрения интеллектуальных систем в железнодорожный транспорт проблема их робастности к внешнему скрытому вмешательству становится все более актуальной. Современные методы СТЗ, основанные на глубоком обучении, показывают высокие результаты при решении задач мониторинга инфраструктуры, однако их чувствительность к состязательным атакам ставит под угрозу надежность работы в реальных, зачастую сложных условиях эксплуатации.

Настоящее исследование продемонстрировало, что архитектура модели играет ключевую роль в обеспечении робастности интеллектуальных систем к скрытым воздействиям. Несмотря на то, что модели семейства *ResNet*, в особенности *ResNet50*, достигли наивысших значений точности на «чистых» данных, их робастность к шуму оказалась существенно ниже по сравнению с моделями на основе *Vision Transformer (ViT-B/16)* и мультимодальной *GPT-4o*. Это позволяет утверждать, что при

проектировании систем для задач мониторинга, где возможны попытки внешнего вмешательства, следует отдавать предпочтение архитектурам, демонстрирующим робастность даже в ущерб незначительному снижению точности на чистых данных.

Эксперименты с добавлением универсального шума по разработанным модификациям (M1 и M2) показали, что даже слабые визуальные возмущения могут существенно снизить качество классификации у большинства моделей. Это подчеркивает необходимость интеграции механизмов защиты уже на этапе проектирования интеллектуальных систем. Модификация M2, основанная на усреднении индивидуальных возмущений, оказалась особенно эффективной для имитации реальных сценариев атак, когда злоумышленник имеет ограниченный доступ к системе, но обладает знаниями о ее архитектуре и типичных данных.

Важно отметить, что мультимодальная модель *GPT-4o*, несмотря на отсутствие дообучения на конкретном датасете, продемонстрировала высокую робастность. Это открывает новые перспективы для применения подобных моделей в условиях недостатка обучающих данных или необходимости адаптации ИИ-систем под разные задачи без переобучения.

Таким образом, результаты работы подчеркивают необходимость пересмотра приоритетов при разработке ИИ-систем для критически важных сфер, таких как железнодорожный транспорт. Не только точность модели, но и ее робастность к внешним воздействиям должны становиться определяющим критерием при выборе архитектурных решений и технологий обучения.

Важным направлением будущих исследований является разработка активных стратегий противодействия атакам, что включает:

- внедрение методов предварительной фильтрации и нормализации входных изображений;
- создание специализированных моделей-детекторов, отслеживающих аномалии в потоках данных.

Не менее значимым направлением остается повышение вычислительной эффективности и адаптация защищенных моделей для работы в режиме реального времени. Особенно акту-

ально это в системах, где задержка в несколько секунд может повлечь за собой серьезные последствия, например при выявлении дефектов на ходу поезда или в условиях круглосуточного мониторинга.

Таким образом, настоящее исследование закладывает основу для дальнейшего совершенствования ИИ-инструментов, робастных к внешнему вмешательству, и служит практическим ориентиром при выборе моделей для задач обеспечения безопасности в железнодорожной отрасли. Полученные результаты могут быть применены при разработке новых стандартов и требований к интеллектуальным системам мониторинга, а также в образовательных программах по кибербезопасности, машинному обучению и транспортной инженерии.

Благодарности

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02. ▲

Список источников

- Кулагин М. А. Обобщение опыта решения задач предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте / М. А. Кулагин, В. Г. Сидоренко // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 4. — С. 55–62.
- Сидоренко В. Г. Интеллектуальная система обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин, Д. М. Родина // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 1. — С. 55–65. — DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65.
- Малинский С. В. Автоматическое определение границ опасных участков железнодорожного пути / С. В. Малинский, А. В. Абрамов, В. О. Шарова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. — Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2025. — С. 624–630. — DOI: 10.30932/9785002587582-2025-624-630.
- Ашрафзянов А. М. Обнаружение и распознавание препятствий перед автомобилем на основе обработки видеоизображений / А. М. Ашрафзянов, М. П. Шлеймович // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. — 2014. — № 2. — С. 197–202.
- Баранов Л. А. Методология обоснования требований безопасности при использовании систем технического зрения в интеллектуальных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: Российский университет транспорта, 2022. — С. 54–58.
- Охотников А. Л. Проекты систем технического зрения для автоматического управления движением / А. Л. Охотников // Автоматика, связь, информатика. — 2023. — № 3. — С. 21–24. — DOI: 10.34649/AT.2023.3.3.003.
- Озеров А. В. Техническое зрение в составе систем автоматического управления движением поездов / А. В. Озеров, А. С. Маршова // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): труды Международной научно-технической конференции, Самара, 18–21 апреля 2022 года / под ред. С. А. Прохорова. — Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. — С. 201–205.
- Lisanti G. A Multi-Camera Image Processing and Visualization System for Train Safety Assessment / G. Lisanti, S. Karaman, D. Pezzatini // arXiv preprint. — 2015. — arXiv:1507.07815. — DOI: 10.48550/arXiv.1507.07815.
- Saritas M. M. et al. Railway Track Fault Detection with ResNet Deep Learning Models // 2023 International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'23). — 2023.
- Сунь Х. Обзор современных систем технического зрения, применяемых в транспортной отрасли / Х. Сунь, С. Чжуан, А. А. Костров // Современные наукоемкие технологии. — 2024. — № 9. — С. 69–73. — DOI: 10.17513/snt.40150.
- Goodfellow I. Explaining and Harnessing Adversarial Examples / I. Goodfellow, J. Shlens, C. Szegedy // arXiv preprint. — 2015 (submitted 20 Dec 2014, revised 20 Mar 2015). — arXiv:1412.6572. — DOI: 10.48550/arXiv.1412.6572.
- Григоренко А. Г. Обзор методов защиты от адверсальной атаки One Pixel в системах машинного обучения / А. Г. Григоренко, Н. А. Васильев, Д. С. Ситдинов // Системы интеллектуального управления и искусственный интеллект: теория и практика: сборник трудов II национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 июня 2024 года. — СПб.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2024. — С. 30–36.
- Хьюбер П. Робастная статистика / П. Хьюбер. М.: Мир, 1984.
- Goodfellow I. J. Making machine learning robust against adversarial inputs / I. J. Goodfellow, J. Shlens, C. Szegedy // Communications of the ACM. — 2018. — Vol. 61. — Iss. 7. — Pp. 56–66. — DOI: 10.1145/3134599.
- Василенко, М. С. Алгоритм машинного обучения для детектирования выбросов и аномалий / М. С. Василенко, А. С. Копырин // Modeling of Artificial Intelligence. — 2019. — № 6-1. — С. 13–18. — DOI: 10.13187/mai.2019.1.13.
- Легашев Л. В. Методика построения устойчивой системы защиты на основе состязательного машинного обучения в беспроводных сетях 6G / Л. В. Легашев, Л. С. Гришина // Вопросы кибербезопасности. — 2023. — № 2(54). — С. 99–108. — DOI: 10.21681/2311-3456-2023-2-99-108.

17. Hou X. High-Speed Rail Operating Environment Recognition Based on Neural Network and Adversarial Training / X. Hou et al. // 2019 IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). — IEEE, 2019. — Pp. 840–847. — DOI: 10.1109/ICTAI.2019.00120.
18. Голдобин И. А. Влияние шумов на алгоритмы цифровой обработки изображений / И. А. Голдобин, Е. И. Климова // Актуальные вопросы развития современной цифровой среды: сборник статей по материалам научно-технической конференции молодых ученых, Москва, 14–16 апреля 2021 года. — Волгоград: Сириус, 2021. — С. 396–402.
19. Котенко И. В. Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований / И. В. Котенко, И. Б. Саенко, О. С. Лаута и др. // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 1(59). — С. 24–37. — DOI: 10.21681/2311-2024-1-24-37.
20. Костюмов В. В. Обзор и систематизация атак уклонением на модели компьютерного зрения / В. В. Костюмов // International Journal of Open Information Technologies. — 2022. — Т. 10. — № 10. — С. 11–20.
21. Potapov A. K. Vulnerabilities of Artificial Intelligence Systems / A. K. Potapov, V. G. Sidorenko // 2024 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (QM&TIS&IT). — IEEE, 2024. — Pp. 84–87. — DOI: 10.1109/QMTISIT63393.2024.10762915.
22. Грачев Я. Л. Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // Надежность. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 67–74. — DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-67-74.
23. Орлов С. П. Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути / С. П. Орлов, Н. А. Ефимушкин, Н. В. Ефимушкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2022. — Т. 30. — № 1(73). — С. 63–74. — DOI: 10.14498/tech.2022.1.4.
24. Федоров В. А. Обнаружение железнодорожной инфраструктуры на основе YOLOv8 с использованием нейронного процессора / В. А. Федоров // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. — 2024. — Т. 520. — № S2. — С. 49–56. — DOI: 10.31857/S2686954324700371.
25. Eunus S. I. ECARRNet: An Efficient LSTM-Based Ensembled Deep Neural Network Architecture for Railway Fault Detection / S. I. Eunus, S. Hossain, A. E. M. Ridwan, A. Adnan et al. // AI. — 2024. — Vol. 5. — Iss. 2. — Pp. 482–503. — DOI: 10.3390/ai5020024.
26. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — Cambridge, MA: MIT Press, 2016. — DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
27. Han K. A Survey on Visual Transformer / K. Han, Y. Wang, H. Chen // arXiv preprint. — 2020. — DOI: 10.48550/arXiv.2012.12556.
28. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation / D. M. W. Powers // Journal of Machine Learning Technologies. — 2011. — Vol. 2. — Iss. 1. — Pp. 37–63. — DOI: 10.48550/arXiv.2010.16061.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 313–326
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-313-326

Robustness of Intelligent Transport Systems Employing Computer Vision for the Analysis of Railway Infrastructure Images

Information about authors

Kulagin M. A., PhD in Engineering, Associate Professor¹.
E-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Yanchenko G. O., Postgraduate Student¹. E-mail: ya@gyanchenko.ru

Rodina D. M., Senior Developer². E-mail: dk.957@ya.ru

Polegenko A. I., Student¹. E-mail: screen.polegenko@mail.ru

¹"Control and Information Security" Department, Russian University of Transport, Moscow

²TI "VTB", Moscow

Abstract: With the growing integration of AI systems in the railway sector, it is becoming essential to ensure their robustness against external interference, particularly subtle alterations in input data. This paper analyses the resilience of various neural network architectures, including ResNet18, ResNet50, Vision Transformer, a convolutional neural network, and the GPT-4o multimodal model, which are used for automated fault detection in the analysis of railway infrastructure images. Experiments have been conducted using adversarial disturbances generated via universal noise derived from a set of transformers. Two attack modifications were employed to simulate real-world interference scenarios with limited data availability. The performance of the models has been evaluated on both untainted images and those compromised by overlaid noise. The outcomes indicate that while ResNet50 attains maximum accuracy on unmodified data, ViT and GPT-4o demonstrate greater resilience to adversarial disturbances. The research emphasizes the importance of selecting model architectures based on both

their accuracy and their robustness against distortions. This paper introduces a method for assessing robustness and offers practical recommendations for developing AI systems designed for application in railway environments where safety is critical.

Keywords: AI systems; railway transport; adversarial attacks; robustness; neural networks; computer image; safety; infrastructure monitoring.

References

1. Kulagin M. A., Sidorenko V. G. Obobshchenie opyta resheniya zadach prediktivnoy analitiki na zheleznodorozhnom transporte [Generalization of experience in solving predictive analytics problems in railway transport]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2024, Iss. 4, pp. 55–62. (In Russian)
2. Sidorenko V. G., Kulagin M. A., Rodina D. M. Intellektual'naya sistema obnaruzheniya narusheniy v soblyudenii trebovaniy bezopasnosti pri rabotakh na ob'ektakh zheleznodorozhnoy infrastruktury [Intelligent system for detecting violations of safety requirements during work on railway infrastructure objects]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport]. 2025, vol. 11, Iss. 1, pp. 55–65. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65. (In Russian)
3. Malinskiy S. V., Abramov A. V., Sharova V. O. Avtomaticheskoe opredelenie granits opasnykh uchastkov zheleznodorozhnogo puti [Automatic determination of boundaries of hazardous sections of railway track]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 22 maya 2025 goda* [Intelligent Transport Systems: Proc. IV Int. Sci.-Pract. Conf., Moscow, 22 May 2025]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta (MIIT) Publ., 2025, pp. 624–630. DOI: 10.30932/9785002587582-2025-624-630. (In Russian)
4. Ashrafzyanov A. M., Shleymovich M. P. Obnaruzhenie i raspoznavanie prepyatstviy pereg avtomobilem na osnove obrabotki videoizobrazheniy [Detection and recog-

- dition of obstacles in front of a vehicle based on video image processing]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva* [Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev]. 2014, Iss. 2, pp. 197–202. (In Russian)
5. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Balakina E. P., Okhotnikov A. L. Metodologiya obosnovaniya trebovaniy bezopasnosti pri ispol'zovanii sistem tekhnicheskogo zreniya v intellektual'nykh sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov [Methodology for justifying safety requirements when using computer vision systems in intelligent train traffic control systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Intelligent Transport Systems: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf., Moscow, 26 May 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 54–58. (In Russian)
 6. Okhotnikov A. L. Proekty sistem tekhnicheskogo zreniya dlya avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem [Projects of computer vision systems for automatic traffic control]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2023, Iss. 3, pp. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2023.3.3.003. (In Russian)
 7. Ozerov A. V., Marshova A. S. Tekhnicheskoe zrenie v sostave sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Computer vision as part of automatic train traffic control systems]. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii (PIT 2022): trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 18–21 aprelya 2022 goda, pod red. S. A. Prokhorova* [Advanced Information Technologies (PIT 2022): Proc. Int. Sci.-Tech. Conf., Samara, 18–21 April 2022, ed. by S. A. Prokhorov]. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN Publ., 2022, pp. 201–205. (In Russian)
 8. Lisanti G., Karaman S., Pezzatini D. A Multi-Camera Image Processing and Visualization System for Train Safety Assessment. arXiv preprint, 2015, arXiv:1507.07815. DOI: 10.48550/arXiv.1507.07815.
 9. Saritas M. M. et al. Railway Track Fault Detection with ResNet Deep Learning Models. 2023 International Conference on Intelligent Systems and New Applications (ICISNA'23), 2023.
 10. Sun Kh., Chzhuan S., Kostrov A. A. Obzor sovremennykh sistem tekhnicheskogo zreniya, primenyaemykh v transportnoy otrasli [Review of modern computer vision systems used in the transport industry]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High-Tech Technologies]. 2024, Iss. 9, pp. 69–73. DOI: 10.17513/snt.40150. (In Russian)
 11. Goodfellow I., Shlens J., Szegedy C. Explaining and Harnessing Adversarial Examples. arXiv preprint, 2015 (submitted 20 Dec 2014, revised 20 Mar 2015), arXiv:1412.6572. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6572.
 12. Grigorenko A. G., Vasil'ev N. A., Sitdikov D. S. Obzor metodov zashchity ot adversal'noy ataki One Pixel v sistemakh mashinnogo obucheniya [Review of methods of protection against the One Pixel adversarial attack in machine learning systems]. *Sistemy intellektual'nogo upravleniya i iskusstvennyy intellekt: teoriya i praktika: sbornik trudov II natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 27 iyunya 2024 goda* [Intelligent control systems and artificial intelligence: theory and practice: collected papers of the II national scientific and practical conference, St. Petersburg, June 27, 2024]. St. Petersburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova Publ., 2024, pp. 30–36. (In Russian)
 13. Kh'yuber P. *Robustnaya statistika* [Robust statistics]. Moscow: Mir Publ., 1984. (In Russian)
 14. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. Making machine learning robust against adversarial inputs. *Communications of the ACM*, 2018, vol. 61, Iss. 7, pp. 56–66. DOI: 10.1145/3134599.
 15. Vasilenko M. S., Kopyrin A. S. *Algoritm mashinnogo obucheniya dlya detektirovaniya vybrosov i anomalij* [A machine learning algorithm for detecting outliers and anomalies]. *Modeling of Artificial Intelligence*, 2019, Iss. 6-1, pp. 13–18. DOI: 10.13187/mai.2019.1.13. (In Russian)
 16. Legashev L. V., Grishina L. S. Metodika postroyeniya ustoychivoy sistemy zashchity na osnove sostyazatel'nogo mashinnogo obucheniya v besprovodnykh setyakh 6G [Methodology for constructing a robust security system based on adversarial machine learning in 6G wireless networks]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues]. 2023, Iss. 2(54), pp. 99–108. DOI: 10.21681/2311-3456-2023-2-99-108. (In Russian)
 17. Hou X. et al. High-Speed Rail Operating Environment Recognition Based on Neural Network and Adversarial Training. 2019 IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), IEEE, 2019, pp. 840–847. DOI: 10.1109/ICTAI.2019.00120.
 18. Goldobin I. A., Klimova E. I. Vliyaniye shumov na algoritmy tsifrovoy obrabotki izobrazheniy [The Impact of Noise on Digital Image Processing Algorithms]. *Aktual'nye voprosy razvitiya sovremennoy tsifrovoy sredy: sbornik statey po materialam nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, Moskva, 14–16 aprelya 2021 goda* [Current Issues in the Development of the Modern Digital Environment: A Collection of Articles Based on the Proceedings of the Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Moscow, April 14–16, 2021]. Volgograd: Sirius Publ., 2021, pp. 396–402. (In Russian)
 19. Kotenko I. V., Saenko I. B., Lauta O. S. et al. Ataki i metody zashchity v sistemakh mashinnogo obucheniya: analiz sovremennykh issledovaniy [Attacks and Defense Methods in Machine Learning Systems: An Analysis of Modern Research]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues]. 2024, Iss. 1(59), pp. 24–37. DOI: 10.21681/2311-2024-1-24-37. (In Russian)
 20. Kostyumov V. V. *Obzor i sistematizatsiya atak ukloeniem na modeli komp'yuternogo zreniya* [Review and systematization of evasion attacks on computer vision models]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, vol. 10, Iss. 10, pp. 11–20. (In Russian)
 21. Potapov A. K., Sidorenko V. G. Vulnerabilities of Artificial Intelligence Systems. 2024 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (QM&TIS&IT), IEEE, 2024, pp. 84–87. DOI: 10.1109/QMTISIT63393.2024.10762915.
 22. Grachev Ya. L., Sidorenko V. G. Ispol'zovanie kachestvennykh kharakteristik izobrazheniya dlya kompleksnogo stegoanaliza [Using qualitative image characteristics for complex steganalysis]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2025, vol. 25, Iss. 1, pp. 67–74. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-67-74. (In Russian)
 23. Orlov S. P., Efimushkin N. A., Efimushkina N. V. Glubokaya neyronnaya set' dlya diagnostiki elementov zheleznodorozhnogo rel'sovogo puti [Deep neural network for diagnostics of railway track elements]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences]. 2022, vol. 30, Iss. 1(73), pp. 63–74. DOI: 10.14498/tech.2022.1.4. (In Russian)
 24. Fedorov V. A. Obnaruzhenie zheleznodorozhnoy infrastruktury na osnove YOLOv8 s ispol'zovaniem neyronnogo protsessora [YOLOv8-Based Railway Infrastructure Detection Using a Neural Processor]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Matematika, informatika, protsessy upravleniya* [Doklady RAS. Mathematics, Informatics, Control Processes]. 2024, vol. 520, Iss. S2, pp. 49–56. DOI: 10.31857/S2686954324700371. (In Russian)
 25. Eunus S. I., Hossain S., A. Ridwan E. M., Adnan A. et al. ECARRNet: An Efficient LSTM-Based Ensembled Deep Neural Network Architecture for Railway Fault Detection. *AI*, 2024, vol. 5, Iss. 2, pp. 482–503. DOI: 10.3390/ai5020024.
 26. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
 27. Han K., Wang Y., Chen H. A Survey on Visual Transformer. arXiv preprint, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2012.12556.
 28. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, vol. 2, Iss. 1, pp. 37–63. DOI: 10.48550/arXiv.2010.16061.

ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ С УЧЕТОМ УСТАНОВКИ И ПЕРЕСТАНОВКИ ГРАНИЦ УСТРОЙСТВ

КОКУРИН Иосиф Михайлович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник¹; e-mail: kokyrim@mail.ru
ПУШКИН Илья Андреевич, аспирант²; e-mail: usrobots@yandex.ru

¹Лаборатория проблем организации транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург

²Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

Представленная работа предлагает новую технологию расчета тормозных путей и длин блок-участков, учитывающую требования норм проектирования и эксплуатации, а также необходимость перестановки границ блок-участков для оптимизации видимости сигналов и размещения устройств. В основе исследования — анализ данных о профиле пути, параметрах движения поездов, а также нормативные документы и результаты моделирования. Предложена методика определения длин блок-участков автоблокировки при различных сценариях перестановки границ и направлениях движения поездов, обеспечивающая равенство суммарной длины блок-участков длине перегона. Технология позволяет рассчитывать длины блок-участков как при стандартных условиях, так и при перестановках устройств, гарантируя, что они будут обеспечивать условия безопасности. Результаты исследований расширяют научные и технические основы проектирования и внедрения систем управления движением поездов.

Ключевые слова: тяговые расчеты; параметры движения; ограничения скорости; режимы снижения скорости; расстояние снижения скорости; длина поезда, интервальное регулирование.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-327-331

▼ Введение

В современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта, с ростом скоростей движения и интенсивности перевозок, критически важным является точное определение длин блок-участков (БУ) и связанных с ними тормозных путей. Нормативные документы^{1,2,3,4} устанавливают требования к минимальной длине БУ, которая должна обеспечивать безопасное движение поездов, в том числе при экстренном торможении [1–3].

В соответствии с нормами максимальные тормозные пути на БУ трехзначной автоблокировки (АБ) должны быть не менее расчетных

длин экстренного торможения для всех категорий поездов при установленной скорости движения. С целью оптимизации пропускной способности на участках приближения к станциям и удаления от них длина первого и последнего БУ перегона определяется и поддерживается равной максимальным тормозным путям соответствующего расчетного поезда [4–6].

При проектировании и модернизации систем интервального регулирования движения поездов и автоматизации управления движением возникает необходимость в перестановке границ БУ и, соответственно, изменении расположения светофоров. Основными причинами таких перестановок являются [7–9]:

- улучшение видимости сигнальных показаний: изменение расположения светофоров и границ БУ может быть продиктовано необходимостью обеспечения оптимальной видимости сигналов машинистами, особенно на кривых участках пути, при наличии препятствий или в условиях сложного рельефа;
- оптимизация размещения устройств: перестановка границ позволяет более рацио-

¹ Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30 декабря 2011 г. № 2864р.

² Инструкция по разработке графиков движения поездов в ОАО «РЖД» Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2006 г. № 2568р.

³ Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12 мая 2016 г. № 867р.

⁴ Руководящие указания по расстановке светофоров автоблокировки и определению длин блок-участков на линиях с АЛСО. 660301. — СПб. ГУП «Гипротрансигнализация». 2003. — 32 с.

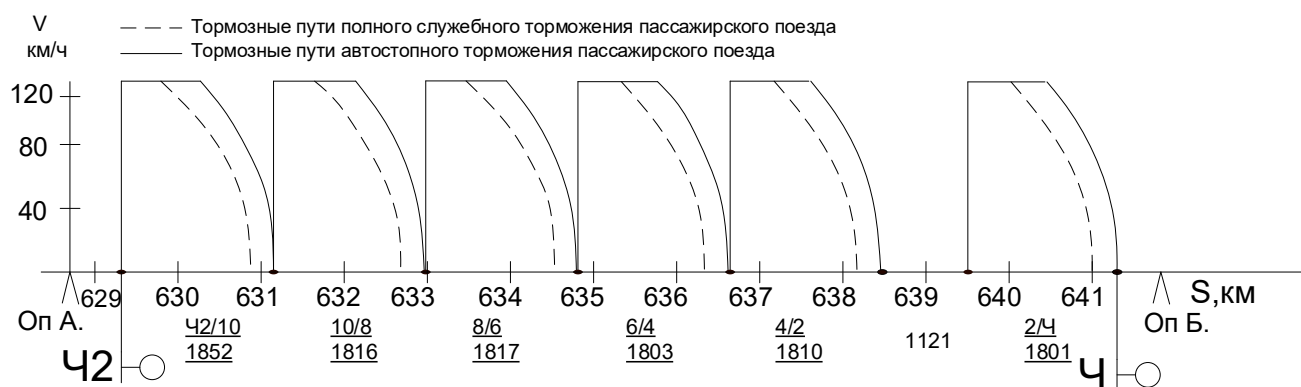


Рис. 1. Размещение на перегоне очереди тормозных путей, избыточной длины и тормозного пути последнего БУ

нально размещать инфраструктурные объекты, такие как светофоры, рельсовые цепи и другие элементы системы сигнализации и связи, минимизируя при этом вмешательство в существующую инфраструктуру и длину прокладываемого кабеля;

- адаптация к условиям эксплуатации: в процессе эксплуатации могут возникать ситуации, требующие корректировки границ БУ для повышения эффективности работы систем, например для улучшения пропускной способности или снижения времени проследования поездов.

В статье предлагается технология расчета тормозных путей и длин БУ, учитывающая установку и перестановку границ участков и устройств.

1. Методика расчета тормозных путей и длин блок-участков

В данной работе рассматривается перегон, на котором определяются максимальные длины тормозных путей: для первого БУ (Ч2/10) — со скорости 120 км/ч от начала перегона; для последнего БУ (2/Ч) — до входного светофора в конце перегона (табл. 1).

Длина перегона (рис. 1) равна длине пути от выходного светофора Ч2 Оп. А до входного светофора Ч Оп. Б, а также сумме тормозных путей и избыточной длины. Сумма очереди максимальных тормозных путей перегона рассчитывается от начала БУ первого до конца последнего: $1852 + 1816 + 1817 + 1803 + 1810 + 1801 = 10\,899$ м.

Разность длины перегона — 12 020 м и суммы тормозных путей — 10 899 м равна избыточной

длине: $12\,020 - 10\,899 = 1121$ м. Эта величина менее тормозного пути 1803 м на этом БУ и распределяется между всеми БУ перегона.

Для определения длин БУ 10/8, 8/6, 6/4 и 4/2 сумма очереди их тормозных путей (табл. 1), равная $1816 + 1817 + 1803 + 1810 = 7246$ м, добавляется к избыточной длине $7246 + 1121 = 8367$ м и делится на количество БУ в группе: $8367/4 = 2091,75$ м.

Равенство суммы длин БУ длине перегона необходимо для автоматического контроля свободы перегона и проверки расчетов: $1852 + 1801 + (2091,75 \cdot 4) = 12\,020$ м.

По результатам тяговых расчетов длины блок-участков (БУ) перегона (табл. 2) составляют не менее величины тормозных путей расчетного поезда.

При избыточной длине БУ (7–9 м), превышающей необходимую для обеспечения равенства длин блок-участков, перегон делится на неравные по длине БУ.

2. Расчеты при перестановке границ устройств

Перестановка границ БУ напрямую влияет на их длины и, как следствие, на распределение избыточной длины и соблюдение нормативных требований. Далее рассматриваются сценарии с перестановкой светофора 8.

Первым делом рассматривается «четная перестановка» светофора 8 (табл. 3). При этом условия для соблюдения требований возникают следующие корректировки длин БУ:

- изменение длины БУ 8/6: длина БУ 8/6, которая ранее составляла 2091,75 м (согласно расчетам без перестановки), требует уменьшения.

Новая длина устанавливается равной 1820 м. Величина уменьшения составляет 271,75 м ($2091,75 - 1820 = 271,75$ м);

- изменение длины БУ 10/8: для компенсации уменьшения БУ 8/6 длина БУ 10/8 увеличивается на ту же величину: $2091,75 + 271,75 = 2363,5$ м;
- ограничение на длину БУ Ч2/10: важно отметить, что при таких перестановках длины БУ Ч2/10 и БУ 10/8 не выравниваются. Это обусловлено строгим требованием, согласно которому длина БУ Ч2/10 не должна превышать максимальный тормозной путь расчетного поезда, который составляет 1852 м.

Для оставшихся БУ в этой группе (БУ 8/6, 6/4 и 4/2) допускается выравнивание для дальнейшего расчета. Длины этих БУ (2091,75, 2091,75 и 1820 м) суммируются и делятся на их количество (3 БУ): $2091,75 + 2091,75 + 1820 = 6003,5$ м. $6003,5 \text{ м} / 3 \text{ БУ} = 2001,17$ м на каждый БУ 8/6, 6/4, 4/2.

Результаты тяговых расчетов (табл. 4) подтверждают, что определенные таким образом длины БУ перегона остаются не менее максимальных тормозных путей расчетного поезда.

Проверка соответствия суммарной длины БУ общей длине перегона для данного сценария (табл. 5) показывает: 1852 (БУ Ч2/10) + 1801 (БУ 2/Ч) + $2363,5$ (БУ 10/8) + $(2001,17 \cdot 3) = 1852 + 1801 + 2363,5 + 6003,5 = 12\,020$ м. Данное равенство подтверждает корректность расчета и распределения длин БУ.

При той же «четной перестановке» светофора 8 в четном направлении происходит обратное распределение изменений:

- длина БУ 8/6 увеличивается до $2091,75 + 271,75 = 2363,5$ м;
- длина БУ 10/8 уменьшается до $2091,75 - 271,75 = 1820$ м;
- ограничение для БУ Ч2/10 и 2/Ч: как и в предыдущем сценарии, длины БУ Ч2/10 и 10/8 не приравниваются из-за требования сохранения длины БУ Ч2/10. В связи с чем длина БУ 10/8 остается без изменений и равной тормозному пути — 1820 м.

Длины БУ 8/6, 6/4 и 4/2 (2091,75, 2091,75 и 2363,5 м) суммируются и делятся на их количество (3 БУ): $(2091,75 + 2091,75 + 2363,5) / 3 = 6547 / 3 = 2182,3$ м. Эти длины представлены в табл. 6.

Таблица 1. Расчеты очереди максимальных тормозных путей расчетного поезда на перегоне

Наименования БУ	Тормозные пути, м
Ч2/10 Оп. А	1852
10/8	1816
8/6	1817
6/4	1803
4/2	1810
2/Ч Оп. Б	1801

Таблица 2. Расчеты тормозных путей и длин БУ до перестановки границ

Наименования БУ	Тормозные пути БУ, м	Длины БУ, м
Ч2/10 Оп. А	1852	1852
10/8	1816	2091,75
8/6	1820	2091,75
6/4	1813	2091,75
4/2	1812	2091,75
2/Ч Оп. Б	1801	1801

Таблица 3. Расчеты тормозных путей и длин БУ при перестановке границ для движения поездов в четном направлении

Наименование БУ	Длины БУ, м	Тормозные пути, м
Ч2/10 Оп. А	1852	1852
10/8	2363,5	1816
8/6	1820	1817
6/4	2091,75	1821
4/2	2091,75	1805
2/Ч	1801	1801

Таблица 4. Расчеты тормозных путей в условиях равенства группы длин БУ перегона при четной перестановке и четном направлении движения

Наименование БУ	Длины БУ, м	Тормозные пути, м
Ч2/10 Оп. А	1852	1852
10/8	2363,5	1816
8/6	2001,17	1817
6/4	2001,17	1815
4/2	2001,17	1800
2/Ч Оп. Б	1801	1801

Таблица 5. Расчет тормозных путей и длин БУ при нечетной перестановке светофора 8 и движении поездов в четном направлении

Наименование БУ	Длины БУ, м	Тормозные пути, м
Оп. А Ч2/10	1852	1852
10/8	1820	1816
8/6	2363,5	1820
6/4	2091,75	1821
4/2	2091,75	1805
Оп. Б 2/Ч	1801	1801

Таблица 6. Расчеты тормозных путей и длин БУ в условиях равенства группы длин БУ перегона при нечетной перестановке светофора 8 и четном направлении движения

Наименование БУ	Длины БУ, м	Тормозные пути, м
Ч2/10 Оп. А	1852	1852
10/8	1820	1816
8/6	2182,3	1817
6/4	2182,3	1815
4/2	2182,3	1800
2/Ч Оп. Б	1801	1801

Суммарная длина БУ равна длине перегона: $1852 \text{ (БУ Ч2/10)} + 1801 \text{ (БУ 2/Ч)} + 1820 \text{ (БУ 10/8)} + (2182,3 \cdot 3) = 5473 + 6547 = 12\,020 \text{ м}$. Данные тяговых расчетов (табл. 6) подтверждают, что длины БУ перегона составляют не менее величины максимальных тормозных путей расчетного поезда.

Заключение

Анализ результатов показал, что предложенная технология эффективно решает задачу определения оптимальных длин БУ при различных сценариях: как в стандартных условиях, так и при перестановках границ сигнальных устройств.

Установлено, что при перестановке границ БУ, обусловленной требованиями улучшения видимости сигнальных показаний и размещения устройств, разработанная технология позволяет корректно перераспределять длины БУ. Это достигается за счет учета как максимальных тормозных путей расчетных поездов, так и необходимости сохранения заданных длин блок-участков (в частности, БУ Ч2/10). Данное

положение подтверждается расчетами для четного и нечетного направлений движения.

Представленная технология вносит существенный вклад в развитие научной и технической базы для проектирования современных систем интервального разграничения и управления движением поездов. Полученные результаты обладают практической значимостью: они позволяют оптимизировать работу железнодорожного транспорта, повысить его безопасность и пропускную способность. ▲

Список источников

1. Кокурин И. М. Технология определения длин фиксированных блок-участков / И. М. Кокурин, И. А. Пушкин // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 10. — С. 9–14. — DOI: 10.34649/AT.2022.10.10.002.
2. Vlasenko S. V. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium / S. V. Vlasenko. — 2nd edition. — Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. — 456 p.
3. Kokurin J. M. Technological Foundations of Traffic Controller Data Support Automation / J. M. Kokurin, D. V. Efanov // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS 2019), Batumi, 13–16 сентября 2019 года. — Batumi, 2019. — P. 8884410. — DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884410.
4. Александров А. Э. Использование имитационной системы ИСТРА для моделирования графика движения поездов / А. Э. Александров, А. В. Шипулин // Транспорт Урала. — 2011. — № 4(31). — С. 67–71. — EDN OOMTWD.
5. Кокурин И. М. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов / И. М. Кокурин, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 5. — С. 19–23. — DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.
6. Розенберг Е. Н. Современные системы управления движением поездов: отечественный и зарубежный опыт / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, А. В. Озеров, В. М. Малинов. — М.: Издательские решения, 2020. — 210 с.
7. Hintze P. "But that's not the kilometre in the plan!" — the potential of georeferenced railway infrastructure data / P. Hintze, F. Pruter // Signal+Draht. — 2018. — Ausgabe 11. — Pp. 6–15.
8. Pan D. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems / D. Pan, Y. Zheng, C. Zhang // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29–31 July 2010. — Pp. 4471–4476.
9. Кокурин И. М. Когнитивный метод для решения задач интервального регулирования движения поездов / И. М. Кокурин, И. А. Пушкин // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 года. — СПб.: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2020. — Т. 2. — С. 18–27.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 327–331
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-327-331

Tractive Effort Calculations with Consideration for the Arrangement and Rearrangement of Block Section Boundaries

Information about authors

Kokurin J. M., Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher¹.

E-mail: kokyrinim@mail.ru

Pushkin I. A., Postgraduate Student². E-mail: usrobots@yandex.ru

¹Transport System Organization Problems Laboratory, N. S. Solomenko Transport Problem Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

²“Automation and Remote Control on Railways” Department, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Abstract: The study puts forth an innovative approach for calculating braking distances and block-section lengths taking into consideration both design and operational standards, as well as the necessity to adjust block-section boundaries to optimize signal visibility and equipment positioning. This research is grounded on an analysis of track profile data, train movement parameters, relevant regulatory documents, and results from simulation. A method is suggested for establishing the lengths of automatic block sections under various scenarios of boundary rearrangement and travel movement directions, ensuring that the total length of block sections equals the distance between stations. The technology enables the calculation of block section lengths under standard conditions and when the equipment is relocated, all while maintaining compliance with safety regulations. The findings provide essential scientific and technical support for the design and implementation of train traffic control systems.

Keywords: tractive effort calculations; train movement parameters; speed limitations; speed reduction mode; speed reduction distance; train length; headway control.

References

1. Kokurin I. M., Pushkin I. A. Tekhnologiya opredeleniya dlin fiksirovannykh blok-uchastkov [Technology for determining the lengths of fixed block sections]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2022, Iss. 10, pp. 9–14. DOI: 10.34649/AT.2022.10.10.002. (In Russian)
2. Vlasenko S. V. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium, 2nd ed. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018, 456 p.
3. Kokurin J. M., Efanov D. V. Technological Foundations of Traffic Controller Data Support Automation. 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS 2019), Batumi, 13–16 September 2019. Batumi, 2019, p. 8884410. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884410.
4. Aleksandrov A. E., Shipulin A. V. Ispol'zovanie imitatsionnoy sistemy ISTR dlya modelirovaniya grafika dvizheniya poezdov [Using the ISTR simulation system for train schedule modelling]. *Transport Urala* [Ural Transport]. 2011, Iss. 4(31), pp. 67–71. (In Russian)
5. Kokurin I. M., Efanov D. V. Tekhnologicheskie osnovy innovatsionnoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Technological foundations of an innovative automatic train control system]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2019, Iss. 5, pp. 19–23. DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003. (In Russian)
6. Rozenberg E. N., Shukhina E. E., Ozerov A. V., Malinov V. M. Sovremennyye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [Modern train control systems: domestic and foreign experience]. Moscow: Izdatel'skie resheniya Publ., 2020, 210 p. (In Russian)
7. Hintze P., Pruter F. “But that’s not the kilometre in the plan!” — the potential of geo-referenced railway infrastructure data. *Signal+Draht*, 2018, Iss. 11, pp. 6–15.
8. Pan D., Zheng Y., Zhang C. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29–31 July 2010, pp. 4471–4476.
9. Kokurin I. M., Pushkin I. A. Kognitivnyy metod dlya resheniya zadach interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Cognitive method for solving interval train regulation problems]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: materialy Yubileyroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 10–11 noyabrya 2020 goda* [Russian Transport: Problems and Prospects — 2020: proceedings of the Jubilee International Scientific and Practical Conference, Saint Petersburg, 10–11 November 2020]. St. Petersburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2020, vol. 2, pp. 18–27. (In Russian)

АВТОМАТ ДЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ: АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА НА ОСНОВЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

МУДРАЯ Наталия Георгиевна, соискатель кафедры¹; e-mail: mydrayanatali@mail.ru

МАРЮХНЕНКО Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, профессор²; e-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

¹Кафедра «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

²Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, Балашиха

В статье предложена архитектура и принцип работы адаптивного управляющего автомата для контроля рельсовых цепей, использующего широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией и методы цифровой обработки сигналов. Для стимулирования применяются зондирующие линейно-частотно-модулированные сигналы, что позволяет совмещать функции передачи информации и диагностики. Основные научные и практические результаты включают разработку структурной схемы управляющего автомата, создание математического аппарата для точной локализации дефектов. Предложен адаптивный алгоритм динамической коррекции порога срабатывания, который снижает количество ложных тревог за счет учета изменяющихся условий эксплуатации (сопротивления балласта, влажности, температуры). Показано, что применение управляющего автомата обеспечивает высокую помехоустойчивость за счет корреляционной обработки широкополосных сигналов, автоматическую подстройку под параметры рельсовой линии и точное определение характера и местоположения повреждения. Разработанный метод позволяет сократить время диагностики неисправностей рельсовых цепей и минимизировать влияние человеческого фактора при обслуживании. Решение может быть интегрировано в современные системы железнодорожной автоматики для повышения безопасности движения.

Ключевые слова: рельсовая цепь; широкополосные сигналы; линейно-частотная модуляция; сопротивление балласта; диагностика; цифровая обработка сигналов; управляющий автомат.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-332-341

▼ Введение

От стабильности и непрерывности работы рельсовых цепей (РЦ) напрямую зависят общая функциональная готовность и безопасность систем управления движением поездов [1].

В условиях стремительного роста интенсивности железнодорожных перевозок, ужесточения требований к безопасности и надежности, а также перехода отрасли к цифровым и интеллектуальным системам управления традиционные методы контроля рельсовых цепей оказываются недостаточно эффективными [2].

Инновационное решение по обеспечению локализации отказа, помехоустойчивости и оперативности диагностики предложено в виде адаптивного управляющего автомата с цифровой обработкой сигналов и широкополосной модуляцией.

Важность обеспечения высокой надежности работы РЦ и достоверности контроля их состояния объясняется, с одной стороны, существенным влиянием их состояния на безопасность перевозок и тяжелыми условиями эксплуатации — с другой.

Тяжелые условия эксплуатации РЦ создаются нагрузками различного характера:

- механическими — от проходящих поездов;
- температурными — обусловленными суточными и сезонными изменениями погоды;
- электрическими — из-за протекания тяговых токов, воздействия блуждающих токов, токов перенапряжений и электромагнитных помех.

Кроме того, влажность балластного слоя и его загрязненность сыпучими грузами постоянно изменяются, что существенно влияет на прохождение сигналов вдоль рельсовой линии [3, 4].

Особенно подвержены воздействиям неблагоприятных факторов соединительные и изоляционные элементы, применяемые в РЦ. Они имеют ограниченный запас механической прочности и работают на пределе своих электрических характеристик, не имея существенного резерва для их компенсации в случае деградации под влиянием внешних факторов [5].

Анализ отказов показывает, что более 30 % всех отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) приходится на РЦ [6]. Большинство отказов в РЦ происходит по причине неисправностей рельсовых линий. Они проявляются изменениями электрического сопротивления из-за обрывов, коротких замыканий, влияния влажности и загрязнений на импеданс балласта [7].

Существующие системы контроля и методы обслуживания не обладают необходимой адаптивностью и оперативностью для эффективного реагирования на динамически меняющиеся условия эксплуатации. Отсутствие точной диагностики не позволяет локализовать отказы и своевременно предотвращать аварии [8].

Авторы предлагают решение, позволяющее применять широкополосные сигналы (ШПС) для контроля параметров РЦ и алгоритм выявления неисправности. В [9–11] доказано, что использование ШПС в качестве стимулирующего сигнала, посылаемого в РЦ с целью контроля ее состояния, целесообразно. Стимулирующий сигнал — это диагностический зондирующий сигнал, целенаправленно генерируемый и подаваемый в рельсовую линию с целью получения отклика, по анализу которого производится оценка текущего состояния параметров цепи.

Следует выделить, что те же сигналы можно использовать для передачи информационных сигналов системам ЖАТ. При этом достигается ряд преимуществ:

- повышается помехоустойчивость РЦ;
- улучшается электромагнитная совместимость с другими устройствами и системами;
- уменьшаются энергозатраты на контроль РЦ.

Целью статьи является разработка управляющего автомата для реализации адаптивного устройства контроля параметров рельсовых цепей с применением ШПС с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

1. Управляющий автомат для рельсовых цепей

Управляющий автомат системы контроля РЦ с применением ШПС представляет собой дискретную логическую систему с замкнутым контуром управления и взаимодействующими блоками (рис. 1), предназначенными для:

- генерирования исходного гармонического сигнала на несущей частоте $f_0 = \text{const}$ с амплитудой $U_m = \text{const}$ и с неизменной начальной фазой $\varphi_0 = 0$;
- формирования широкополосного частотно-модулированного сигнала с заданной девиацией частоты F_c ;
- согласованной передачи в рельсовой линии широкополосного стимулирующего сигнала;
- приема и обработки выходного с рельсовой линии контрольного сигнала;
- принятия решения о результатах контроля рельсовой линии.

К основным компонентам управляющего автомата относятся:

- генератор ЛЧМ-сигнала;
- аналого-цифровой преобразователь;
- цифровой согласованный фильтр;
- блок диагностики и адаптации;
- система управления.

Генератор ЛЧМ-сигнала формирует стимулирующий прямоугольный импульсный ШПС длительностью $\tau_{\text{шпс}}$ на несущей частоте f_0 , модулированной по линейному закону с девиацией частоты F_c и шириной спектра $\Delta F_{\text{шпс}} \gg F_c$. Такой сигнал

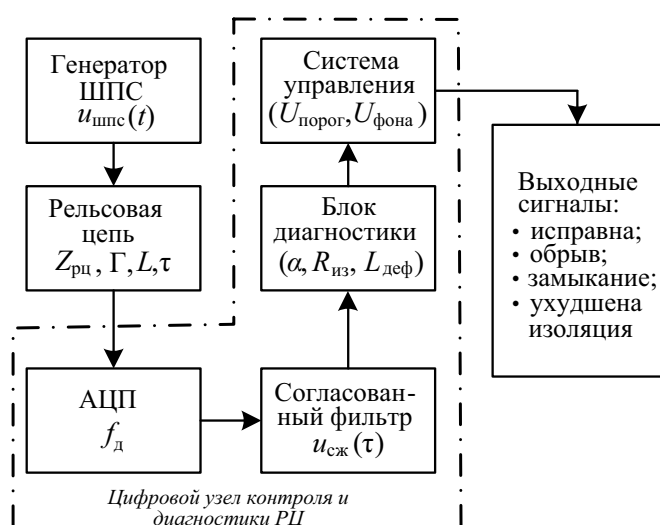


Рис. 1. Структурная схема управляющего автомата для диагностики РЦ с ШПС

за счет широкополосности обеспечивает высокую помехоустойчивость системы контроля.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый выходной сигнал с рельсовой линии в цифровую форму для обеспечения применения цифровой обработки и фильтрации. АЦП характеризуется высокой разрядностью и частотой дискретизации.

Цифровой согласованный фильтр реализует оптимальную обработку ЛЧМ сигнала, снимаемого с выхода рельсовой линии. В результате формируется цифровой образ отклика фильтра в виде импульса длительностью

$$\tau_{\text{вых}} = \frac{\tau_{\text{шпс}}}{k_{\text{сж}}},$$

где $k_{\text{сж}}$ — коэффициент сжатия:

$$k_{\text{сж}} = \tau_{\text{шпс}} \Delta F_{\text{шпс}}.$$

Благодаря сжатию принятого сигнала сформированный согласованной фильтрацией отклик на фоне шумов и помех превышает отношение сигнал/шум до согласованной фильтрации в $k_{\text{сж}}$ раз.

Блок диагностики и адаптации предназначен для анализа параметров рельсовой цепи (затухание, сопротивление балласта, наличие обрывов) и автоматически корректирует пороги срабатывания в зависимости от условий эксплуатации.

Система управления координирует работу всех блоков и формирует принятие решения о состоянии РЦ (исправна или неисправна) и передает данные далее по сети передачи данных связи.

2. Обработка сигналов и адаптивная диагностика неисправностей

Сгенерированный ЛЧМ-сигнал $u_{\text{шпс}}(t)$ подается в РЦ через путевой трансформатор. Процесс инициирования и генерация зондирующего сигнала начинается по истечении временного интервала ΔT или при получении внешней команды. В этом случае система формирует детерминированный зондирующий сигнал — ЛЧМ [11]. Его аналитическая модель описывается уравнением

$$u_{\text{шпс}}(t) = A \cdot \text{rect}[U(t/T)] \cdot \cos[2\pi \cdot (f_0 t + (\beta/2) \cdot t^2)], \quad (1)$$

где A — амплитуда;

$\text{rect}[U(t/T)]$ — прямоугольный импульс длительностью T ;

f_0 — начальная частота, $\beta = (f_1 - f_0)/T$ — скорость изменения частоты.

Рельсовая линия представляет собой длинную линию передачи с распределенными параметрами. Волновое сопротивление рельсовой линии:

$$Z_{\text{рл}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (2)$$

где R — погонное сопротивление рельса (активное), Ом/м;

L — погонная индуктивность рельсовой линии, Гн/м;

$G = 1/R_{\text{из}}$ — погонная проводимость изоляции, где $R_{\text{из}}$ — погонное сопротивление изоляции, Ом/м;

C — погонная емкость между рельсом и землей, Ф/м;

$\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, рад⁻¹.

При распространении сигнал встречает неоднородности, вызывающие отражение части энергии, такие как стыки рельсов, балласт, дефекты: обрывы, замыкания, коррозия [12].

Коэффициент отражения Γ на границе двух участков с разными $Z_{\text{рл}}$:

$$\Gamma = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1), \quad (3)$$

где Z_1 — волновое сопротивление до неоднородности, Ом;

Z_2 — волновое сопротивление после неоднородности, Ом.

По значению коэффициента отражения можно сделать вывод о состоянии РЦ контролируемого участка. При обрыве рельса $Z_2 \rightarrow \infty$. В месте обрыва происходит полное отражение контрольного сигнала без инверсии фазы, $\Gamma = +1$.

При коротком замыкании $Z_2 \rightarrow 0$. Происходит отражение с инверсией фазы $\Gamma = -1$.

При значениях $-0,5 < \Gamma < +0,5$ можно говорить об ухудшении изоляции, где происходит частичное отражение.

Локализацию дефекта возможно определить по формуле:

$$L = \frac{v \cdot \tau}{2}, \quad (4)$$

где L — расстояние до места отражения, м;
 v — скорость распространения сигнала в РЦ, м/с;
 τ — задержка между переданным и отраженным сигналом, с.

Скорость v зависит от погонных параметров рельса, то есть определяется инерционными (L) и емкостными (C) свойствами линии:

$$v = 1 / \sqrt{LC}. \quad (5)$$

Чем выше индуктивность L , тем медленнее меняется ток и скорость падает, или чем больше емкость C , тем дольше заряжаются участки линии, значит, скорость также падает. Формула выводится из телеграфных уравнений. Данное выражение допустимо при:

- достаточно высокой частоте ($f > 1$ кГц) ввиду того, что можно пренебречь R и G , так как ωL и ωC доминируют;
- хорошем состоянии РЦ (малое $R_{\text{рц}}$, сухой балласт).

При частоте ниже 1 кГц скорость распространения сигнала характеризуется выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2\omega^2 LC}{(\omega^2 LC)^2 + (RC + GL)^2 \omega^2}}, \quad (6)$$

ввиду того что на низких частотах $\omega L \approx R$ омические потери сравнимы с индуктивным сопротивлением, а ток утечки сравним с емкостным током, так как $\omega C \approx G$.

Задержка τ измеряется путем параллельного корреляционного сравнения, принимаемого в конце линии отраженного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ и K копий исходного контрольного ЛЧМ сигнала $u_{\text{шпс}}(t)$, который подается в начало линии с временными сдвигами τ_k , $k = 1, 2, 3, \dots, K$.

Отраженный сигнал $u_{\text{вх}}(t)$, характеризующийся уравнением

$$u_{\text{вх}}(t) = \Gamma \cdot u_{\text{шпс}}(t - \tau_k), \quad (7)$$

поступает на АЦП и дискретизируется

$$u_{\text{вх}}(n) = u_{\text{вх}}\left(n/f_d\right), \quad (8)$$

где f_d — частота дискретизации, Гц;
 n — номер отсчетов.

Для выделения полезного сигнала на фоне шумов и измерения задержки τ применяется метод параллельного корреляционного сравнения. Принятый сигнал $u_{\text{вх}}(n)$ сравнивается с K копиями исходного ЛЧМ-сигнала $u_{\text{шпс}}(n)$, каждая из которых имеет временной сдвиг k .

Выходной сигнал для каждого из K каналов коррелятора (комплексная огибающая корреляционной функции) рассчитывается по формуле [13]:

$$y_k[n] = \sum_{m=0}^{K-1} u_{\text{вх}}[m] \cdot u_{\text{шпс}}[m - n + k], \quad (9)$$

где $u_{\text{шпс}}[m - n + k]$ — комплексно-сопряженная копия исходного сигнала;

k — индекс канала (временной сдвиг контрольной копии сигнала);

$y_k[n]$ — выходная корреляционная функция в k -ом канале;

m — переменная суммирования.

Пик на выходе $y_k[n]$ соответствует моменту прихода отраженного сигнала. Максимум $y_k[n]$ возникает при k_{max} , где k_{max} — номер канала с максимальной амплитудой.

Задержка τ между зондирующим и принятым сигналами определяется по положению этого максимума:

$$\tau = k_{\text{max}} / f_d. \quad (10)$$

Затухание сигнала показывает, как сильно сигнал ослабляется в рельсе и характеризуется формулой:

$$\alpha = \frac{20}{L} \lg(U_{\text{шпс}} / U_{\text{вх}}). \quad (11)$$

Сопротивление изоляции определяет качество изоляции рельса:

$$R_{\text{из}} \approx \frac{(U_{\text{шпс}} - U_{\text{вх}})}{I_{\text{вх}} \cdot K_{\text{тр}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{вх}}$ — входной ток (А), подаваемый в РЦ;
 $K_{\text{тр}}$ — коэффициент трансформации.

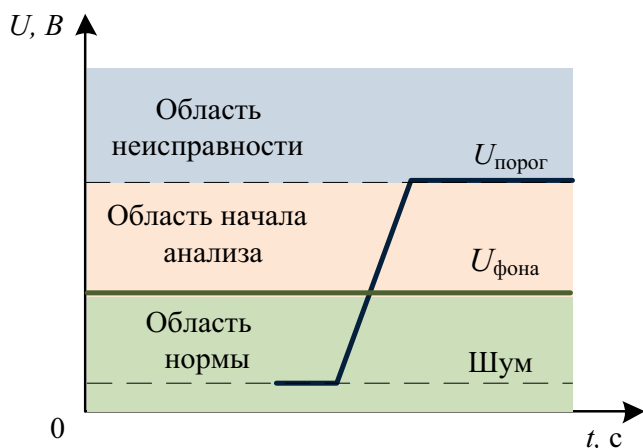


Рис. 2. Адаптивное определение неисправности в рельсовой цепи

Данные параметры служат для диагностирования состояния РЦ.

Алгоритм адаптивной коррекции порогов срабатывания реализует динамическую адаптацию порога детектирования неисправностей в РЦ на основе статистического анализа сигнальной среды (рис. 2). Система в реальном времени вычисляет два ключевых параметра: фоновый уровень сигнала — среднее значение напряжения в исправной цепи и уровень шумов — среднеквадратическое отклонение флуктуаций сигнала.

Пограничное значение для детектирования неисправностей определяется как:

$$U_{\text{порог}} = U_{\text{фона}} + v \cdot \sigma_{\text{шума}}, \quad (13)$$

где $U_{\text{фона}}$ — фоновый уровень сигнала;

$\sigma_{\text{шума}}$ — среднеквадратическое отклонение флуктуаций сигнала;

v — коэффициент, который выбирается исходя из требуемого уровня достоверности обнаружения (чем больше k , тем выше запас по помехам).

Фоновый уровень сигнала характеризуется уравнением:

$$U_{\text{фона}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i, \quad (14)$$

где U_i — мгновенное значение напряжения в i -й момент времени, В;

N — количество учитываемых отсчетов.

В памяти хранится массив из N последних значений U_i . При каждом новом измерении: прошлый отсчет удаляется, новый добавляется в конец, пересчитывается сумма и $U_{\text{фона}}$.

Фоновый уровень сигнала $U_{\text{фона}}$ является постоянной величиной в идеальных условиях и изменяется под воздействием сопротивления балласта, зависящего от его загрязнений, а также от влажности, температуры, разброса характеристик разных участков пути, дрейфа параметров РЦ [14, 15].

Адаптивный расчет $U_{\text{фона}}$ создает математический базис для автоматической подстройки под текущие условия, что позволяет снизить количество ложных срабатываний и повысить чувствительность к реальным неисправностям РЦ. Напряжение $U_{\text{фона}}$ является расчетной базовой величиной. Она определяет «нормальное» состояние системы и позволяет адаптивно настраивать порог детектирования, компенсируя внешние воздействия.

Формирование диагностических сигналов происходит следующим образом:

1. При превышении $U_{\text{вх}} > U_{\text{порог}}$ система регистрирует неисправность.

2. При выполнении условий $\tau \approx 0$, $\alpha \approx 0$ принимается решение о замыкании рельсовой линии.

3. Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ значительно ниже фонового уровня $U_{\text{фона}}$ (например, близко к нулю или ниже минимально допустимого порога) и корреляционный пик на выходе каналов $y_k[n]$ отсутствует либо его амплитуда ничтожно мала, что указывает на отсутствие полезного сигнала, принимается решение об обрыве рельсовой линии.

4. Если $R_{\text{из}} < R_{\text{порог}}$, то принимается решение об ухудшении изоляции.

Адаптивное определение неисправности в РЦ представлено на рис. 2.

3. Концепция программы контроля рельсовых цепей

На основе предоставленного технического описания можно перейти к созданию концепции для визуальной программы, которая демонстрирует предложенный адаптивный метод контроля РЦ с использованием ЛЧМ-сигналов.

Рассматриваемая программа состоит из нескольких процессов (рис. 3):

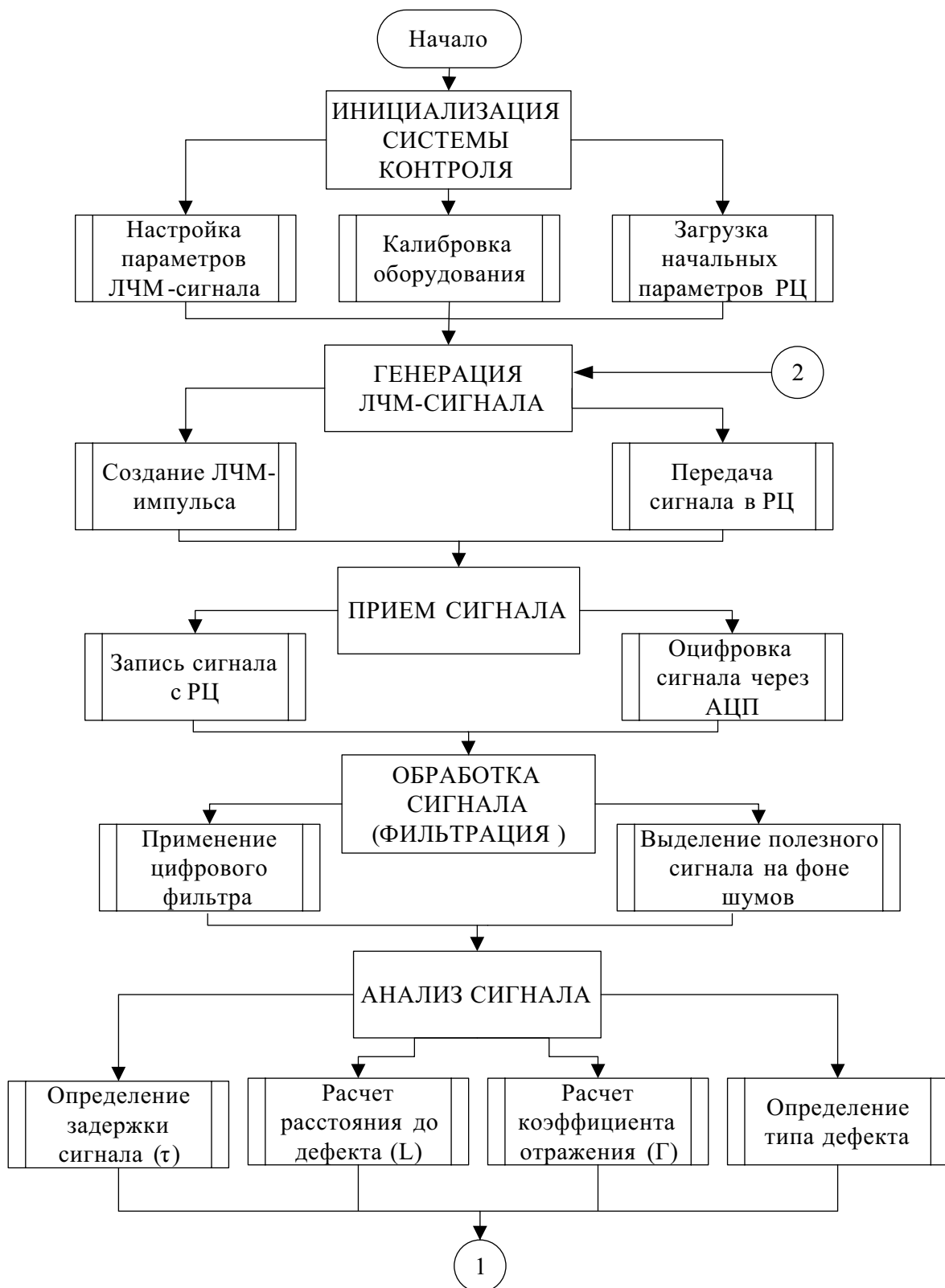
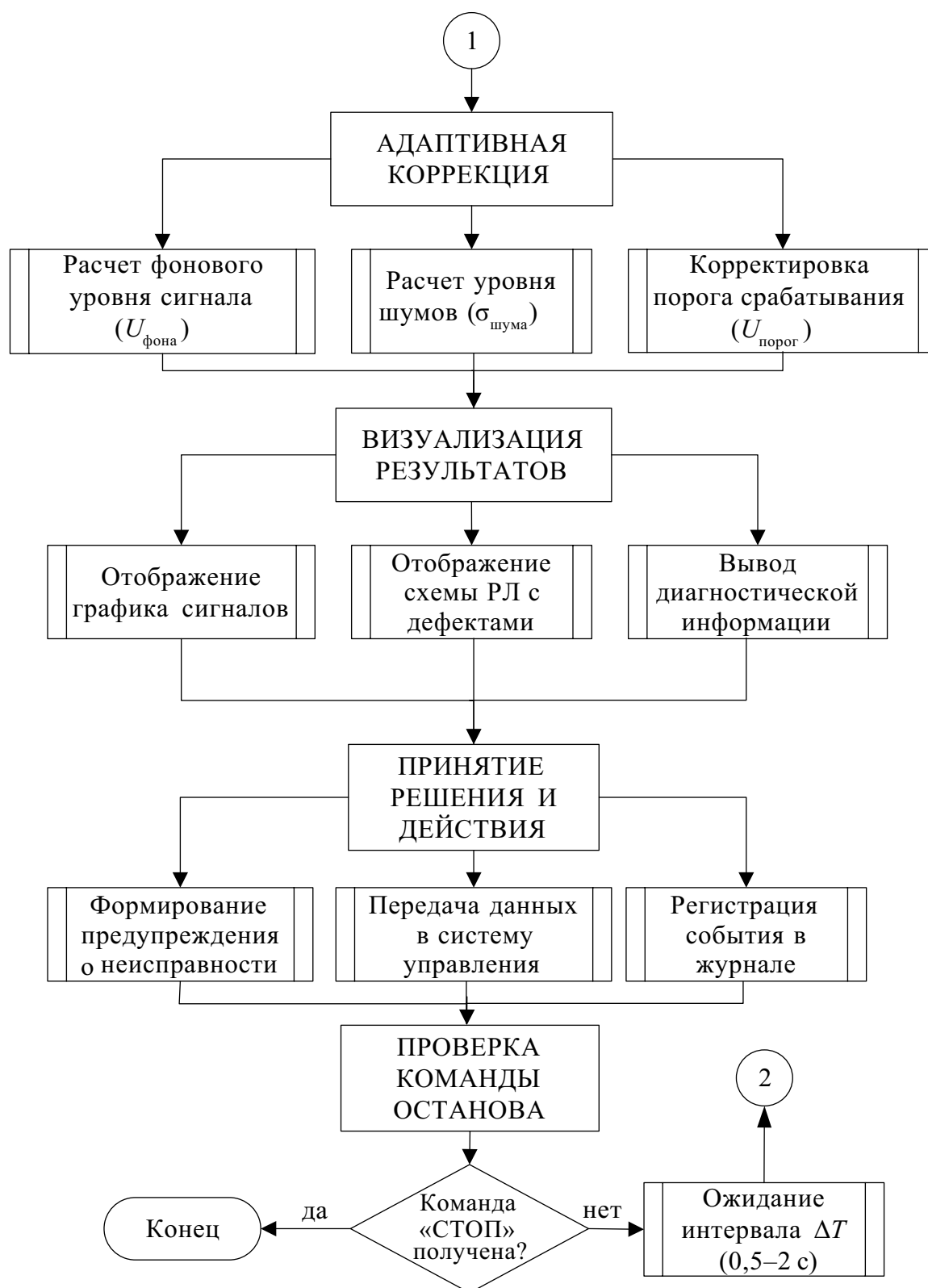


Рис. 3. Блок-схема программы контроля рельсовых цепей (начало)

**Рис. 4.** Блок-схема программы контроля рельсовых цепей (окончание)

1. *Инициализация.* Настройка параметров и подготовка оборудования к работе.

2. *Генерация сигнала.* Создание «зондирующего» (или «стимулирующего») сигнала (ЛЧМ), который отправляется в РЦ.

3. *Прием сигнала.* Система принимает сигнал и оцифровывает его.

4. *Анализ.* Разбор полученного сигнала, определяя: есть ли дефект, какого типа дефект (обрыв, короткое замыкание, ухудшение изоляции), где расположен дефект.

5. *Адаптация.* Автоматическая подстройка под текущие условия (влажность, температура и пр.), чтобы уменьшить количество ложных срабатываний.

6. *Визуализация.* Отображение результатов на экране в виде графиков и схем (мнемосхема).

7. *Действия.* Формирование предупреждения и передача информации в систему управления.

8. *Цикл.* Повторение процесса с заданным интервалом для непрерывного контроля.

Программа работает автоматически, постоянно отслеживая состояние РЦ и адаптируясь к изменяющимся условиям окружающей среды. Алгоритм реализации программы контроля показан на рис. 3, 4.

Реализация метода предусматривает два варианта архитектуры системы:

1. Активная диагностика с дополнительным зондирующим сигналом, при которой ШПС используется в качестве дополнительного стимулирующего воздействия, параллельного основному сигнальному току. Это обеспечивает диагностику без модификации базового протокола передачи данных.

2. Сквозная диагностика, предполагающая синтез основного сигнального тока РЦ на основе ШПС. В этом случае информационные и стимулирующие функции совмещаются в одном физическом носителе, что создает основу для построения адаптивных и самодиагностируемых РЦ.

Выводы

Управляющий автомат выступает ядром системы контроля, обеспечивающей непрерывный мониторинг состояния РЦ в реальном времени и автоматическое принятие решений для поддержания их исправности. Адаптивное

управление обеспечивает надежный контроль состояния РЦ за счет применения современных методов цифровой обработки сигналов: эффективно фильтрует и компенсирует внешние помехи, снижает энергозатраты при сохранении высокой точности диагностики.

Принцип работы основан на корреляционном анализе ШПС, что обеспечивает высокую точность измерений даже в условиях сильных помех. Математический аппарат позволяет количественно оценивать состояние РЦ по трем ключевым параметрам:

- расстоянию до дефекта;
- затуханию;
- сопротивлению изоляции.

К преимуществам предложенного решения относятся:

- адаптивность к изменению параметров РЦ;
- высокая помехоустойчивость;
- быстрое обнаружение неисправностей;
- возможность самодиагностики.

Реализация такого автомата позволяет:

- существенно повысить безопасность железнодорожных перевозок;
- оптимизировать процессы технического обслуживания;
- снизить эксплуатационные затраты. ▲

Список источников

1. Марюхненко В. С. Критические и предотказные состояния на транспорте / В. С. Марюхненко, М. Г. Комогорцев // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. — 2007. — Т. 1. — № 4. — С. 3–4.
2. Сперанский Д. В. Задачи оптимизации ресурсов в области технической эксплуатации систем автоматики и телемеханики / Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, А. В. Орлов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 184–203. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203.
3. Радковский С. А. Корреляционный анализ влияния погодных условий на рельсовые цепи / С. А. Радковский, А. В. Сацюк, Е. Г. Воевода // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. — 2022. — № 65. — С. 4–12.
4. Марюхненко В. С. Физико-технические аспекты изменения сопротивления балласта железнодорожных путей / В. С. Марюхненко, Н. Г. Мудрая // Вопросы естествознания. — 2016. — № 1(9). — С. 25–34.
5. Шаманов В. И. Влияние условий эксплуатации на электрические и магнитные параметры рельсовых линий / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 2. — С. 109–119. — DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119.

6. Соколов М. М. Классификации состояния рельсовой цепи на основании значения ее входного сопротивления / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Известия Транссиба. — 2023. — № 1(53). — С. 45–53.
7. Соколов М. М. Построение условного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты / М. М. Соколов // Известия Транссиба. — 2018. — № 2(34). — С. 150–158.
8. Бушуев А. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация: монография / А. В. Бушуев, В. И. Бушуев, С. В. Бушуев. — Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2014. — 311 с.
9. Марюхненко В. С. Алгоритмизация первичной обработки радиосигналов / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад // Системный анализ в проектировании и управлении: труды X Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 28 июня — 10 июля 2006 г.) / С. Е. Воронько, Л. А. Прус. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2006. — 218 с. — С. 98–101.
10. Мудрая Н. Г. Применение шумоподобных сигналов для контроля сопротивления балласта железнодорожных путей / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко; науч. ред. В. Н. Бондаренко; отв. за вып. А. А. Левицкий // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. — 628 с. — С. 84–87.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 332–341
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-332-341

Railway Circuit Controller: Adaptive Control and Digital Processing Based on Broadband Signals

Information about authors

Mudraya N. G., Applicant of the Department¹. E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru
Maryukhnenko V. S., Doctor of Engineering, Professor².
E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

¹Department of “Automation of Production Processes”, Irkutsk State Transport University, Irkutsk

²Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Troops, Balashikha

Abstract: This research presents a framework and principles of functioning of an adaptive control device designed to monitor railway circuits. This device utilizes broadband signals featuring linear frequency modulation, along with advanced digital signal processing techniques. By utilizing linearly frequency-modulated probing signals as stimuli, it facilitates the integration of information transmission and diagnostic functions. Significant scientific and practical contributions include the formulation of a structural diagram of the control device and the establishment of a mathematical framework for accurate fault localisation. Additionally, an adaptive algorithm for dynamic threshold adjustment has been proposed to minimize false alarm occurrences, taking into consideration fluctuating operating conditions such as ballast resistance, humidity and temperature. The research has demonstrated that the use of this automatic controller can ensure high interference immunity through the correlated processing of broadband signals, automatic adjustment to varying railway parameters, and precise identification of both the nature and location of damage. The developed method will enable reduced diagnostic time for railway circuit faults and minimized impact of human factors during maintenance. This solution can be integrated into contemporary railway automation systems to enhance traffic safety.

Keywords: Railway circuit; broadband signals; linear frequency modulation; ballast resistance; diagnostics; digital processing of signals; controller.

11. Мудрая Н. Г. Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля с применением шумоподобных сигналов / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 2(62). — С. 141–150. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141-150.
12. Савушкин С. А. Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата / С. А. Савушкин, В. Г. Горбунов, А. В. Лемешкова // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2023. — № 2(21). — С. 8–13. — DOI: 10.47501/ITNOU.2023.2.08-13.
13. Зачиняев Ю. В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю. В. Зачиняев // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 5. — С. 118.
14. Oukhellou L. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster — Shafer classifier fusion / L. Oukhellou, A. Debiolles, T. Dencœux, P. Akinin // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2010. — Vol. 23. — Pp. 117–128. — DOI: 10.1016/j.engappai.2009.06.005.
15. de Bruin T. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks / T. de Bruin, K. Verbert, R. Babuska // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. — 2016. — Vol. 28. — Pp. 1–11. — DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2551940.

References

1. Maryukhnenko V. S., Komogortsev M. G. Kriticheskie i predotkaznye sostoyaniya na transporte [Critical and pre-failure states in transport]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. 2007, vol. 1, Iss. 4, pp. 3–4. (In Russian)
2. Speransky D. V., Gorelik A. V., Orlov A. V. Zadachi optimizatsii resursov v oblasti tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Tasks of resource optimization in the field of technical operation of automation and telemechanics systems]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 184–203. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203. (In Russian)
3. Radkovsky S. A., Satsyuk A. V., Voevoda E. G. Korrelyatsionnyy analiz vliyaniya pogodnykh usloviy na rel'sovye tsepi [Correlation analysis of the influence of weather conditions on track circuits]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of Donetsk Institute of Railway Transport]. 2022, Iss. 65, pp. 4–12. (In Russian)
4. Maryukhnenko V. S., Mudraya N. G. Fiziko-tekhnicheskie aspekty izmeneniya soprotivleniya ballasta zheleznodorozhnykh putey [Physical and technical aspects of changes in the ballast resistance of railway tracks]. *Voprosy estestvoznaniya* [Issues of Natural Science]. 2016, Iss. 1(9), pp. 25–34. (In Russian)
5. Shamanov V. I. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na elektricheskie i magnitnye parametry rel'sovykh liniy [Influence of operating conditions on electrical and magnetic parameters of track circuits]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2025, vol. 11, Iss. 2, pp. 109–119. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-109-119. (In Russian)
6. Sokolov M. M., Khodkevich A. G. Klassifikatsii sostoyaniya rel'sovoy tsepi na osnovanii znacheniya yeye vkhodnogo soprotivleniya [Classification of track circuit state based on its input resistance value]. *Izvestiya Transsiba* [Trans-Siberian Bulletin]. 2023, Iss. 1(53), pp. 45–53. (In Russian)
7. Sokolov M. M. Postroyeniye uslovnogo algoritma diagnostirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty [Construction of a conditional algorithm for

- diagnosing station track circuits of tonal frequency]. *Izvestiya Transsiba* [Trans-Siberian Bulletin]. 2018, Iss. 2(34), pp. 150–158. (In Russian)
8. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. *Rel'sovye tsepi: teoreticheskie osnovy i ekspluatatsiya: monografiya* [Track circuits: theoretical foundations and operation: monograph]. Yekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2014, 311 p. (In Russian)
 9. Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Algoritmizatsiya pervichnoy obrabotki radio-signalov [Algorithmization of primary radio signal processing]. *Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii: trudy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 28 iyunya — 10 iyulya 2006 g.)* [System Analysis in Design and Management: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference (Saint Petersburg, June 28 — July 10, 2006)]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskoy universitet Publ., 2006, 218 p., pp. 98–101. (In Russian)
 10. Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S., sci. ed. Bondarenko V. N.; exec. ed. Levitsky A. A. *Primeneniye shumopodobnykh signalov dlya kontrolya soprotivleniya ballasta zheleznodorozhnykh putey* [Application of noise-like signals for monitoring ballast resistance of railway tracks]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki: sbornik nauchnykh trudov* [Modern Problems of Radio Electronics: Collection of Scientific Papers]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet Publ., 2015, 628 p., pp. 84–87. (In Russian)
 11. Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Algoritm vyavleniya neispravnosti rel'sovoy tsepi v sisteme kontrolya s primeneniym shumopodobnykh signalov [Algorithm for detecting track circuit faults in a monitoring system using noise-like signals]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019, Iss. 2(62), pp. 141–150. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141-150. (In Russian)
 12. Savushkin S. A., Gorbunov V. G., Lemeskova A. V. *Metody otsenki stoimosti adaptatsii zheleznodorozhnoy infrastruktury k izmeneniyu klimata* [Methods for assessing the cost of adapting railway infrastructure to climate change]. *ITNOU: Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management]. 2023, Iss. 2(21), pp. 8–13. DOI: 10.47501/ITNOU.2023.2.08-13. (In Russian)
 13. Zachinyayev Yu. V. *Analiz i klassifikatsiya formirovateley lineynno-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochkoy zreniya umen'sheniya dlitel'nosti formiruyemykh signalov* [Analysis and classification of linear frequency-modulated radio signal generators from the viewpoint of reducing signal duration]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012, Iss. 5, p. 118. (In Russian)
 14. Oukhellou L., Debiolles A., Dencœux T., Aknin P. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster — Shafer classifier fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, vol. 23, pp. 117–128. DOI: 10.1016/j.engappai.2009.06.005.
 15. De Bruin T., Verbert K., Babuska R. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, vol. 2

ПРЕДИКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В РАВНИННЫХ РЕКАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Муконина Мария Ильинична, старший преподаватель; e-mail: mukonina_m@bk.ru

Кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

В статье рассматривается задача повышения безопасности транспортной инфраструктуры посредством разработки интеллектуальной имитационной модели. Основной фокус сделан на прогнозировании уровня воды в равнинных реках для предупреждения внештатных ситуаций: подтоплений, обрушений мостов и других чрезвычайных происшествий, способных парализовать транспортное сообщение. Актуальность исследования определяется совокупностью факторов: нарастающими климатическими рисками (паводки, ливни, наводнения), техногенными угрозами, а также ограниченной эффективностью традиционных подходов к мониторингу и прогнозированию гидрологической обстановки. В ходе исследования проведен анализ реальных чрезвычайных ситуаций, наглядно демонстрирующих острую потребность в оперативном прогнозировании уровня воды. Методология разработки системы поддержки принятия решений базируется на технологиях машинного обучения. Экспериментальная часть исследования выполнена на основе данных по р. Темерник. Было протестировано 12 моделей машинного обучения, проведена оценка качества прогнозирования на основе статистических метрик, и выбраны наилучшие модели для дальнейшего использования.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура; чрезвычайные ситуации; мониторинг уровня воды; интеллектуальное имитационное моделирование; система поддержки принятия решений; машинное обучение; прогнозирование уровня воды; AutoGluon; NeuralNetFastAI; WeightedEnsemble_L2; равнинные реки; управление рисками.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-342-354

▼ Введение

Надежность работы транспортной отрасли в значительной степени зависит от правильности и оперативности принятий управленческих решений. Особенно ярко это проявляется на фоне быстро изменяющегося климата, переменчивой политической обстановки, а также увеличения количества происшествий техногенного характера.

Ответом на вышеперечисленные вызовы может стать усовершенствование процесса принятия решений на основе интеллектуальной обработки данных. Предиктивное моделирование — это метод, позволяющий анализировать и прогнозировать возможные сценарии развития событий, что критически важно для обеспечения безопасности и эффективности работы транспортной инфраструктуры. Оно включает в себя разработку компьютерных моделей, способных воспроизводить поведение сложных систем в условиях внештатных

событий. Эти модели учитывают множество факторов: технические характеристики объектов, погодные условия, действия персонала и другие переменные.

В отечественной науке вопросу разработки имитационных моделей, описывающих поведение различных производственных и бизнес-процессов, посвящено большое количество научных работ. В статье [1] Е. В. Арефьева и А. В. Рыбаков предлагают инновационный подход к прогнозированию опасностей, основанный на использовании постоянно действующей ситуационно-оптимизационной модели. В отличие от разовых статических моделей, их система работает в режиме реального времени, непрерывно актуализируя данные и адаптируясь к изменениям. Ключевая идея метода заключается в том, что модель не только анализирует текущее состояние объекта, но и активно ищет оптимальные решения для предотвращения угроз. Это позволяет перейти

от простого реагирования к заблаговременному предупреждению рисков в таких областях, как промышленная и экологическая безопасность, энергетика и транспорт.

Предметом исследования статьи [2] является комплексная проблема прогнозирования и моделирования зон затопления на территории Северного Казахстана. Основное внимание уделяется оценке рисков наводнений с применением современных цифровых моделей рельефа, что позволяет получить детальное представление о потенциальных зонах подтопления. Методологическая база исследования построена на применении современных научных методов: гидрологическом цифровом прогнозном моделировании, детальных цифровых моделях рельефа, анализе космических снимков и батиметрической съемке. Ограничения исследования связаны с необходимостью регулярного обновления данных, зависимостью от качества исходных материалов и потребностью в дальнейших исследованиях для уточнения моделей.

Статья [3] посвящена актуальной проблеме обнаружения знаний в данных, где основное внимание уделяется интеграции методов data mining и машинного обучения. Авторы фокусируются на разработке комплексных подходов к извлечению полезной информации из больших массивов данных. Исследователи ставят перед собой задачу систематизировать и развить существующие методы обнаружения знаний в данных. Особое внимание уделяется созданию эффективных алгоритмов, которые можно успешно применять в различных практических областях.

Работа [4] посвящена разработке метода краткосрочного прогнозирования водного режима рек и водохранилищ Донбасса с использованием модели Брауна. Актуальность работы обусловлена тем, что традиционные трендовые регрессионные модели демонстрируют высокую погрешность при прогнозировании нестационарных и персистентных временных рядов, характерных для гидрологических процессов. В качестве решения авторы предлагают адаптивную модель Брауна — разновидность модели скользящего среднего, которая требует малого количества наблюдений, способна

адаптироваться к изменениям исходных данных и учитывает взвешенность предыдущих наблюдений. Проведенное исследование показало, что наименьшая погрешность прогнозирования (7–19 %) достигается при значениях коэффициента сглаживания $\alpha = 0$ и $\alpha = 0,25$, тогда как при $\alpha = 1,0$ погрешность возрастает до 63 %. Практическая значимость метода заключается в возможности оперативного прогнозирования изменений водного режима, что особенно важно для своевременного принятия мер по защите от паводков и регулированию водных ресурсов при условии правильного подбора коэффициента сглаживания.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что выбранная тематика исследования является достаточно актуальной, так как позволяет произвести оценку реального состояния объекта без затрат на практические эксперименты. Необходимо отметить, что все исследуемые научные работы содержат либо теоретический характер, описывая процесс моделирования с точки зрения методологии, либо содержат разработку моделей для узконаправленной отрасли.

Целью исследования является разработка предикативной модели поведения равнинных рек для поддержки принятия управленческих решений в сфере обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры с целью предотвращения внештатных ситуаций.

1. Актуальность задачи мониторинга уровня воды

Наиболее уязвимыми местами, происшествие на которых может повлечь за собой остановку движения транспорта на длительный срок [5], а также большие финансовые затраты на его возобновление — это мосты через реки. Так, 2 июня 2020 г. река Кола вышла из берегов [6] и подтопила опоры железнодорожного моста, что привело к его обрушению (рис. 1).

В Воронежской области во время паводка 2018 г. затопило 22 моста, что привело к серии обрушений мостов. Мост через р. Савала (рис. 2) упал во время проезда грузовика [7], что является следствием сочетания перегруза и ослабления опор из-за размыва.



Рис. 1. Мост через реку Кола, июнь 2020 г.
(фото: Мурманский вестник / Лев Федосеев)



Рис. 2. Мост через реку Савала во время паводка, 2018 г.
(фото: «РИА Воронеж» / Жанна Асанова)

Однако мосты — не единственные объекты транспортной инфраструктуры, подверженные негативному влиянию природных факторов. За последние 10 лет в России произошло большое количество случаев затопления железнодорожных вокзалов и станций из-за паводков, ливней и наводнений. Затопление пути и вокзальных помещений привело к остановке движения поездов на несколько часов, а общий ущерб составил 760 млн рублей.

Так, аномальные дожди в Иркутской области вызвали разливы рек Ангара и Иркут, а также затопление станций в Тулуне

и Нижнеудинске. В результате было прервано движение по Транссибирской магистрали.

В июне 2020 г. ливни в городе Ростове-на-Дону привели к подтоплению железнодорожного вокзала Ростов-Главный [8] (рис. 3).

Все вышеперечисленные примеры свидетельствуют об актуальности задачи мониторинга уровня воды в равнинных реках вблизи критически важных объектов транспортной инфраструктуры для возможности принятия предупредительных мер, направленных на снижение материального ущерба и исключение человеческих жертв.



Рис. 3. Перрон вокзала Ростов-Главный, июнь 2020 г.
(скриншот из видео: Mail.ru / Сергей Заблоцкий)

2. Методология исследования

Машинное обучение играет важнейшую роль в разработке методик прогнозирования уровня воды в реках. Используя различные алгоритмы и методы обработки данных, модели машинного обучения могут анализировать исторические данные об уровне воды в реке и предсказывать будущие уровни с высокой точностью и достоверностью.

Эти модели обладают способностью распознавать закономерности в больших массивах данных, что делает их подходящими для динамического характера гидрологических данных [9]. Для выбора подходящей модели машинного обучения был использован фреймворк AutoGluon.

AutoGluon может автоматически выполнять предварительную обработку данных, включая очистку данных, выбор признаков и операции по проектированию признаков (рис. 4). С помощью класса TabularPredictor фреймворк способен производить автоматическое обучение модели машинного обучения.

В данном исследовании AutoGluon-Tabular предлагается использовать для построения 12 моделей прогнозирования уровня воды в реке (LightGBMXt, LightGBM, LightGBM-Large, RandomForestMSE, ExtraTreesMSE, CatBoost, NeuralNetTorch, XGBoost, NeuralNet-FastAI, WeightedEnsemble_L2, KNeighborsUnif, KNeighborsDist).

Для оценки эффективности предложенного подхода используются показатели стандартных метрик оценки качества предиктивной модели. Эти показатели включают среднеквадратичную ошибку (MSE), среднеквадратичную ошибку (RMSE), среднюю абсолютную ошибку (MAE), средние абсолютные процентные ошибки (MAPE). В этом исследовании была выбрана система с самыми низкими показателями RMSE и MAE [10].

3. Подготовка данных для обучения интеллектуальной модели прогнозирования

Источником экспериментальных данных будут являться метеорологические сводки и данные с датчиков измерения уровня воды.

В рамках данного исследования реализован подход, ориентированный не на прогнозирование поведения общего речного стока, а на изучение локального изменения уровня воды в рамках выбранной мостовой конструкции равнинной реки с целью применения полученных данных расчета нагрузок на опоры, позволяющего обеспечить безопасную эксплуатацию сооружения. Выбранная для исследования точка также располагается вблизи железнодорожного вокзала г. Ростова-на-Дону, что позволит не только исследовать влияние уровня воды на конструкцию мостового сооружения, но и производить

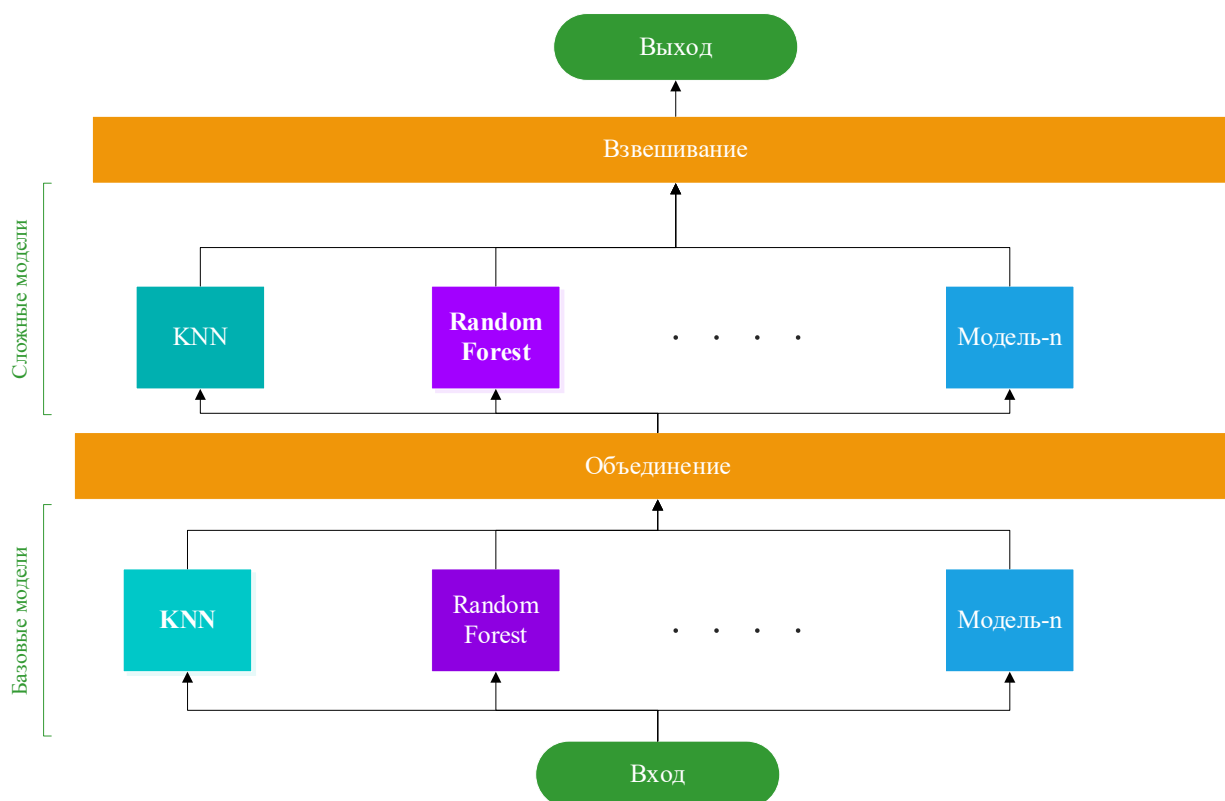


Рис. 4. Принцип работы фреймворка AutoGluon

своевременный мониторинг возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с затоплением железнодорожных путей.

Для проведения анализа возможностей цифровых сервисов, предоставляющих сведения о погодных условиях, в качестве источника данных для обучения модели был выбран веб-ресурс gr5.ru и выгружен архив, содержащий в себе данные о погодных условиях с 2021 по 2024 г. в Ростове-на-Дону.

Для мониторинга изменения уровня воды в реке была использована система мониторинга параметров окружающей среды «Эмерсит», в которой содержится информация со специализированных датчиков измерения воды в различных реках. Для проведения эксперимента была выбрана р. Темерник — равнинная река в Ростовской области, правый приток Дона. Ее длина составляет 33 км, из которых 18 км проходят по территории Ростова-на-Дону. Площадь водосборного бассейна — 293 км². Средний уклон реки — 2,3 %. Ширина русла в среднем до 10 м, глубина — 0,3–0,8 м [11].

Данная река неоднократно становилась причиной чрезвычайных ситуаций на объектах

транспортной инфраструктуры в г. Ростове-на-Дону. Для мониторинга уровня воды в р. Темерник была выполнена выгрузка данных за трехлетний период с датчика «ЭМЕРСИТ-0239», расположенного по координатам: 47.214991° с. ш., 39.698011° в. д. Датчик имеет следующие контрольные уровни:

- уровень датчика — 20,650 м;
- неблагоприятное явление (Н/Я) — 3,400 м;
- опасное явление (О/Я) — 3,900 м.

После выделения ключевых параметров был проведен их детальный анализ с целью выявления аномалий и определения необходимости дополнительной обработки данных (рис. 5–10).

После проведения анализа графиков распределения величин можно сделать следующие выводы:

1. Распределение уровня воды (*BSV*) имеет асимметричный вид с пиком в области низких значений уровня воды, в свою очередь, весь диапазон значений включает в себя величины от 0,3 до 20 ед. в БСВ. При этом выбросы в диапазоне до 7,5 можно считать естественными, вызванными обильным уровнем осадков или ветровыми явлениями. Выбросы, которые

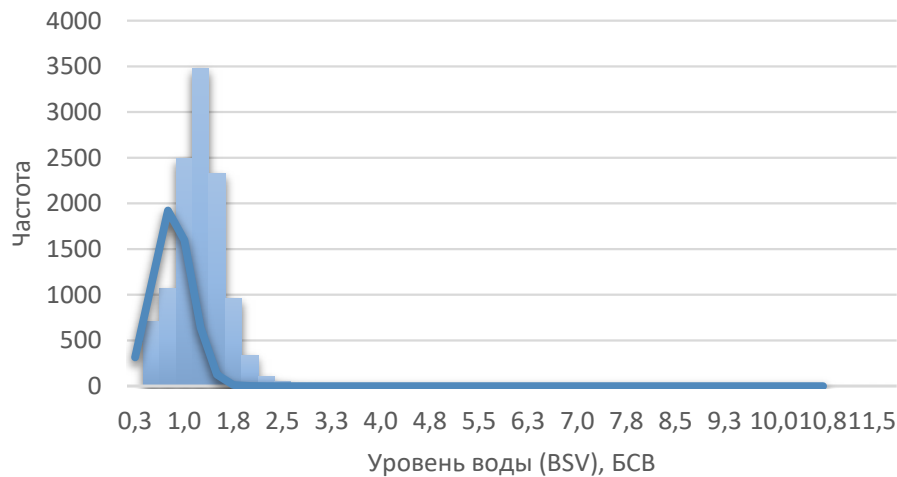


Рис. 5. Распределение уровня воды в балтийской системе высот

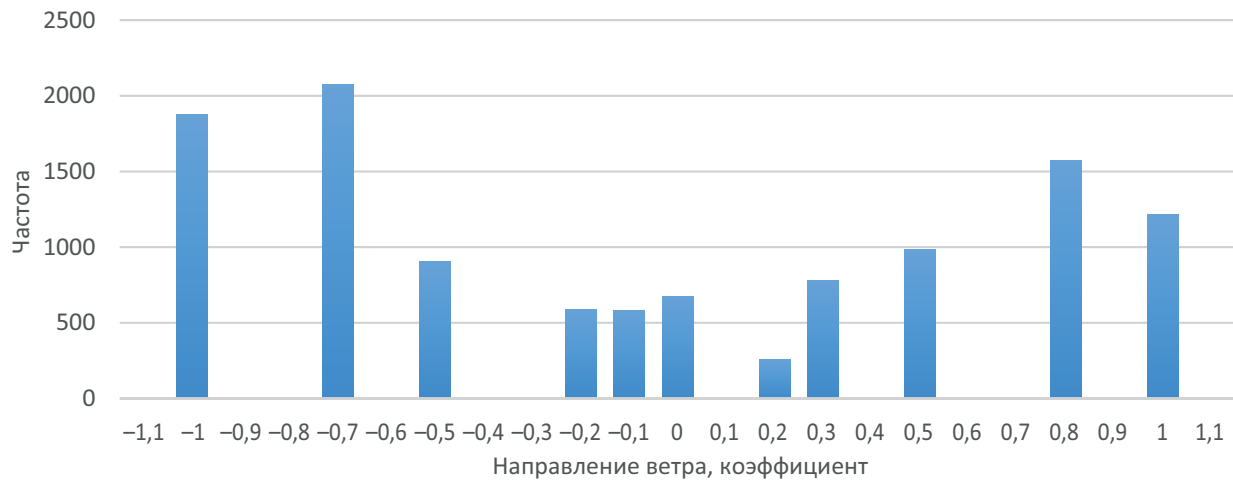


Рис. 6. Распределение величины коэффициента, указывающего направление ветра

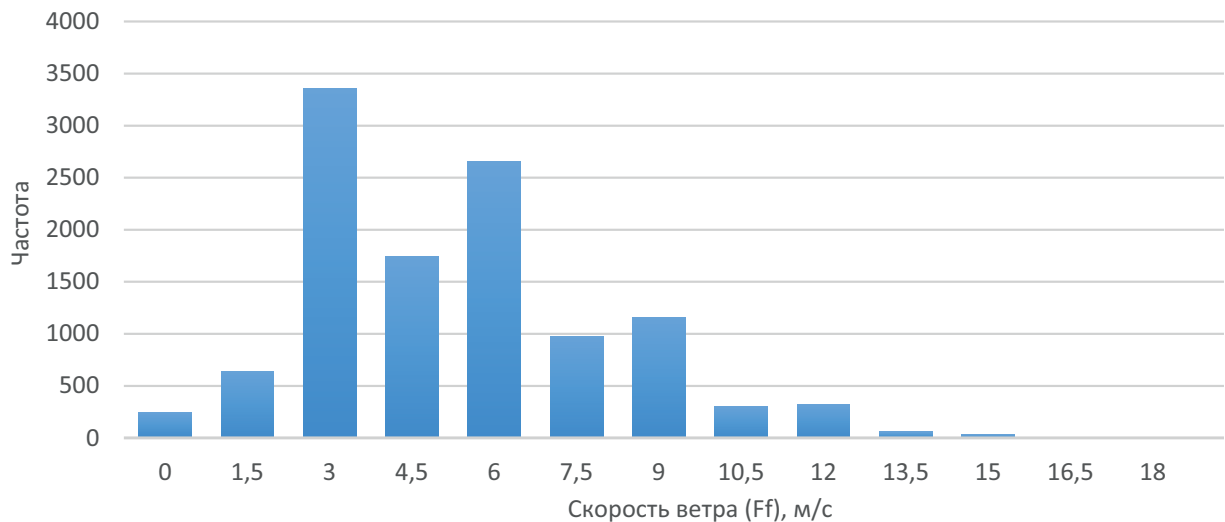


Рис. 7. Распределение величины скорости ветра

имеют значительно больший диапазон, необходимо будет удалить из выборки, так как они были получены вследствие некорректной работы измеряющего датчика.

2. При изучении гистограммы, отражающей распределение переменной *DD* (направление ветра), можно отметить, что форма распределения носит многопиковый (модальный)

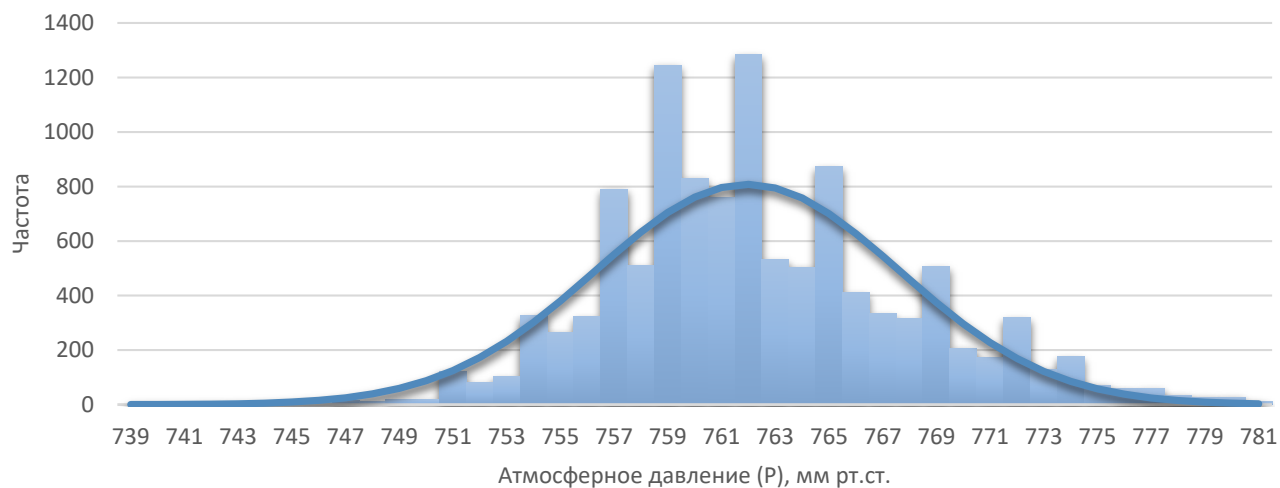


Рис. 8. Распределение величины атмосферного давления

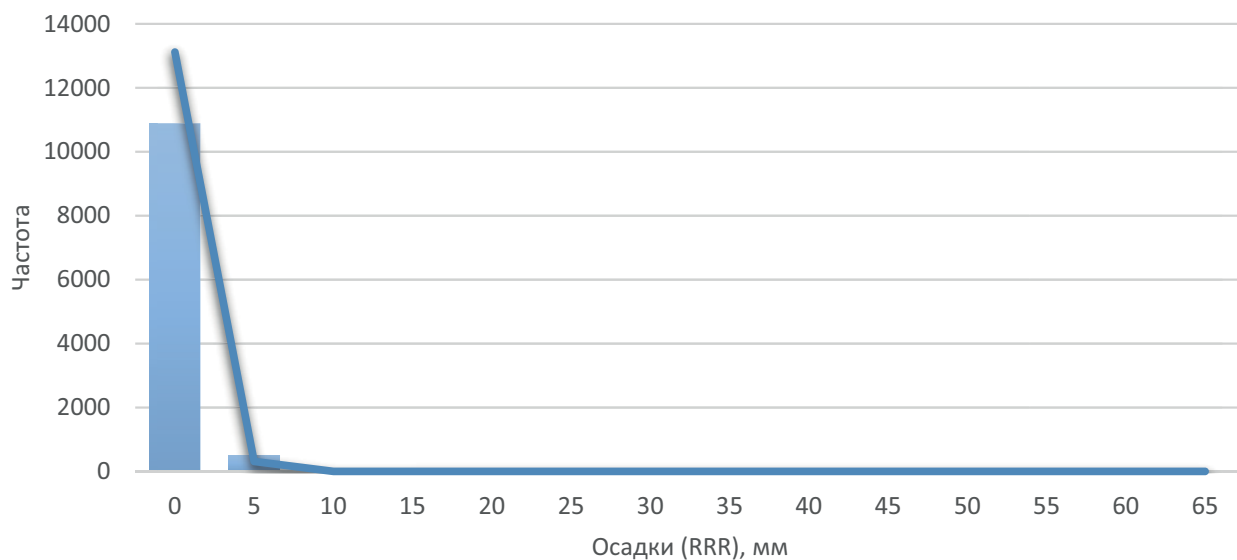


Рис. 9. Распределение уровня осадков

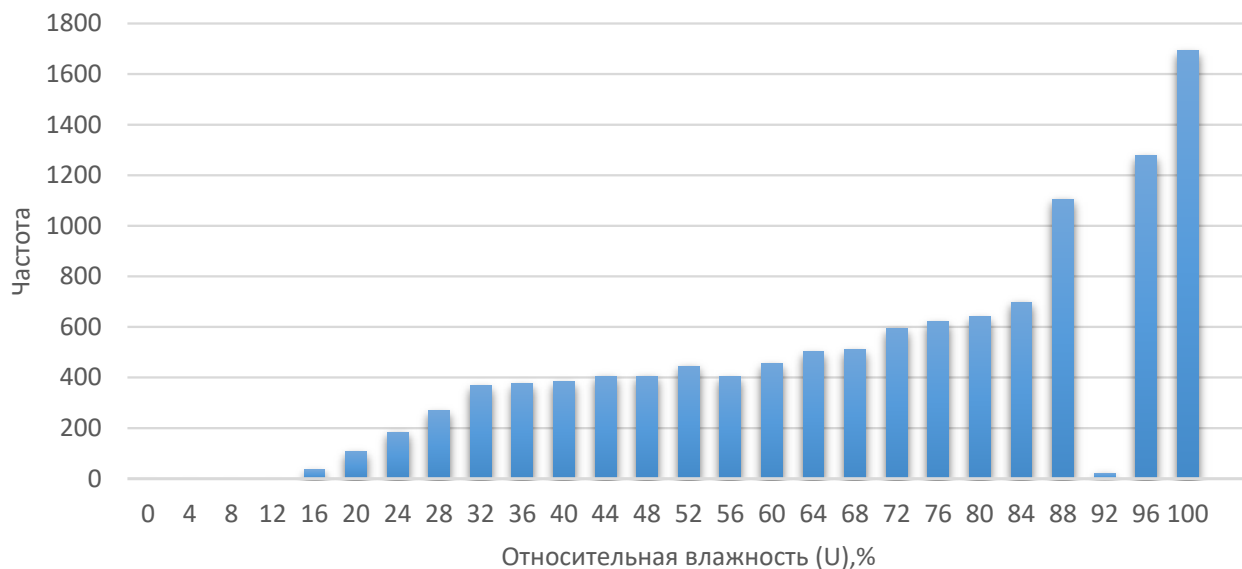


Рис. 10. Распределение величины относительной влажности

характер. Это свидетельствует о том, что в исследуемой области преобладают несколько ключевых направлений ветра — ветер чаще всего дует с определенных румбов. Диапазон значений переменной DD охватывает интервал от $-1,00$ до $1,00$, так как категориальные данные были преобразованы в числовые значения на основе анализа физических аспектов влияния направления ветра на формирование уровня воды на выбранном участке реки, а также расчета статистических характеристик для удобства анализа. Распределение значений скорости ветра имеет явный перекося вправо, что достаточно типично для данной величины.

3. Распределение скорости ветра (Ff) носит модальный (многопиковый) характер, что говорит о неравномерности ветровой активности: определенные скорости ветра заметно преобладают над другими. Это связано с локальными климатическими особенностями. Самый значительный пик наблюдается около значения $2,5$ м/с — такая скорость ветра встречается наиболее часто (частота ≈ 1750 наблюдений). Это указывает на преобладающий «фоновый» ветер в исследуемой локации. Большинство наблюдений сосредоточено на низких и умеренных скоростях ветра, а сильные порывы являются исключением.

4. Анализ гистограммы атмосферного давления (P) показал, что в исследуемой выборке наблюдается достаточно стабильная картина: центральное значение давления сосредоточено около отметки 760 мм рт. ст., что соответствует уровню нормального атмосферного давления. При этом экстремальные значения фиксируются достаточно редко, что свидетельствует о незначительной вариативности показателей в выборке. Структура распределения давления близка к нормальному распределению (симметричная «колоколообразная» форма, значения постепенно убывают от центра к «хвостам» графика). Такая закономерность типична для метеорологических наблюдений в умеренных широтах, где атмосферные условия в целом отличаются относительной стабильностью.

5. Основная масса наблюдений в гистограмме уровня осадков (RRR) сконцентрирована в нижней части диапазона — вблизи нулевой отметки. Это свидетельствует о том,

что преобладающее число измерений фиксирует либо полное отсутствие осадков, либо их крайне незначительный объем. Этот факт наглядно демонстрирует доминирование «сухих» периодов в исследуемой выборке. Еще одной важной характеристикой распределения является его асимметричность. Распределение явно скошено влево. Кроме того, распределение отличается отсутствием равномерности. На гистограмме не прослеживается наличие промежуточных «пиков» — после начального всплеска частоты на минимальных значениях RRR наблюдается практически мгновенный обрыв. Это подчеркивает крайнюю неравномерность распределения: доминирует узкий диапазон низких значений, а переходы к более высоким уровням осадков происходят крайне редко.

6. Распределение величины относительной влажности (U) явно скошено вправо в сторону высоких значений. Медиана наблюдений составляет примерно 80% и располагается ближе к верхнему квартилю. В целом распределение носит явно асимметричный характер, при этом выбросы практически отсутствуют.

Помимо анализа графика распределений был проведен статистический анализ входных данных, результаты которого представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что в современных условиях уровень воды в речных системах зачастую определяется не столько локальными погодными факторами, сколько антропогенным регулированием водного стока посредством гидротехнических сооружений. В связи с этим помимо данных о погоде в систему был добавлен динамический поправочный коэффициент, учитывающий водосброс на Цимлянской ГЭС (табл. 2).

4. Обучение и тестирование моделей на основе машинного обучения

В качестве средства разработки интеллектуальных моделей был выбран язык Python [12]. Выбор данного языка обусловлен наличием в его структуре большого количества библиотек и фреймворков, которые позволяют разрабатывать высокопроизводительные интеллектуальные модели на основе ML.

Таблица 1. Статистический анализ данных для ML-модели

	date	P , мм рт. ст.	U , %	DD , коэф.	Ff , м/с	RRR , мм	BSV , БСВ
count	11503	11503	11503	11503	11503	11503	11503
mean	2023-01-31 18:14:55	761,96	70,24	-0,086	4,81	0,233737	1,123
min	2021-02-01 00:00:00	739,60	12,00	-1,00	0,00	0,00	0,336
25 %	2022-01-31 16:30:00	758,20	51,00	-0,75	3,00	0,00	0,882
50 %	2023-01-28 03:00:00	761,20	75,00	-0,10	4,00	0,00	1,105
75 %	2024-02-08 16:30:00	765,00	93,00	0,50	6,00	0,00	1,335
max	2025-02-09 15:00:00	781,60	100,00	1,00	17,00	60,00	19,650
std	NaN	5,67	23,47	0,69	2,73	1,74	0,586

Таблица 2. Зависимость корректирующего коэффициента от величины водосброса

Водосброс, м ³ /с	80	180	280	380	480	580	680	780	880	980	1080	1180
Коэффициент	-0,12	-0,06	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54

Для построения моделей машинного обучения на основе фреймворка AutoGluon в проект был импортирован модуль *autogluon.tabular* [13].

Следующим этапом разработки является подготовка данных. На основе проведенного выше анализа были выбраны алгоритмы, позволяющие нормализовать исходный массив данных с целью обеспечения корректной работы будущей модели (корректировка выбросов, заполнение пропусков, типизация). Для учета сезонных зависимостей было произведено преобразование абсолютных временных меток в набор дискретных сезонных признаков, позволяющих алгоритмам машинного обучения распознавать и учитывать циклические закономерности в данных.

Необходимо учитывать временные задержки между выпадением осадков и их воздействием на целевую переменную, поскольку возникает эффект временного запаздывания. Это особенно критично для построения адекватных прогнозных моделей в гидрологии. В связи с этим в предобработку данных была включена операция создания лагов посредством операции сдвига временного ряда с использованием метода *shift(n)*. При 3-часовом интервале наблюдений были выбраны коэффициенты лагирования, равные 8 и 16, что соответствуют 24-часовой и 48-часовой задержкам соответственно.

В связи с тем, что величина осадков в большинстве случаев принимает нулевое значение, для улучшения интерпретируемости признака

был добавлен бинарный индикатор, фиксирующий сам факт наличия или отсутствия осадков в рассматриваемый период.

Для учета накопленного воздействия осадков на целевую переменную был применен метод скользящих статистик, позволяющий анализировать кумулятивное влияние. Техническая реализация предполагает вычисление сумм атмосферных осадков за различные временные периоды с использованием метода *rolling().sum()*, где параметр *window* определяет глубину анализируемого временного горизонта.

На практике использовались два основных временных масштаба анализа. Скользящая сумма за 24 часа (*window=8*), отражающая краткосрочное воздействие осадков и являющаяся критически важным параметром для оценки суточного водного баланса и оперативного прогнозирования гидрологической обстановки. Семидневный горизонт (*window=56*), предоставляющий информацию о среднесрочных тенденциях увлажнения, позволяет оценить степень насыщения водосборных бассейнов и формирование устойчивых гидрологических трендов.

Важным шагом в процессе обучения интеллектуальной модели является деление исходного массива данных на обучающую и тестовую выборки. Он необходим для обеспечения объективной оценки работы модели. В нашем исследовании исходная выборка данных была разделена в процентном соотношении 80 на 20.

Таблица 3. Расчет метрик качества обученных ML-моделей

Model	MSE	RMSE	MAE	R^2	Correlation
NeuralNetFastAI	0,028	0,166	0,130	0,692	0,881
WeightedEnsemble_L2	0,028	0,167	0,131	0,687	0,863
LightGBMLarge	0,029	0,171	0,145	0,674	0,916
XGBoost	0,030	0,172	0,141	0,668	0,889
ExtraTreesMSE	0,034	0,184	0,140	0,623	0,904
CatBoost	0,034	0,185	0,147	0,618	0,880
LightGBMXT	0,045	0,213	0,149	0,493	0,874
NeuralNetTorch	0,051	0,227	0,195	0,426	0,895
RandomForestMSE	0,058	0,241	0,175	0,350	0,873
LightGBM	0,122	0,350	0,233	-0,366	0,799
KNeighborsUnif	0,141	0,376	0,313	-0,578	0,472
KNeighborsDist	0,142	0,377	0,314	-0,584	0,473

Примечание: R^2 — коэффициент детерминации, Correlation — коэффициент корреляции между предсказаниями и истинными значениями.

В качестве функции, измеряющей ошибку обучения моделей, был выбран корень из среднеквадратической ошибки (RMSE). Процесс обучения модели направлен на уменьшение RMSE [14].

После задания параметров обучения (начальной скорости обучения, числа эпох, коэффициента регуляризации, штрафа регуляризации и др.) запускается процесс построения моделей с помощью метода fit(). В ходе прогноза и проверки работоспособности модели был использован метод predict() для получения предсказанных значений на основе новых данных.

В рамках проведенного исследования был выполнен сравнительный анализ предсказательной способности ряда алгоритмов машинного обучения. Оценка осуществлялась на основе общепринятых метрик качества, позволяющих всесторонне оценить точность и надежность моделей (табл. 3).

Основываясь на результатах статистических данных, можно выделить модели NeuralNetFastAI и WeightedEnsemble_L2. Модели показали лучшее качество на тестовых данных. Именно они будут использоваться в качестве моделей по умолчанию.

Наилучшие результаты продемонстрировали две модели — NeuralNetFastAI и WeightedEnsemble_L2. Их показатели практически идентичны: MSE составляет около 0,028, RMSE находится в диапазоне 0,166–0,167,

MAE — 0,130–0,131, R^2 варьируется от 0,687 до 0,692, а коэффициент корреляции — от 0,863 до 0,881. Сочетание минимальных значений ошибок (MSE, RMSE, MAE) и максимальных значений коэффициента детерминации (R^2) однозначно выделяет эти модели как наиболее эффективные в рассматриваемом наборе алгоритмов.

Для визуализации работы моделей на тестовых данных была использована графическая библиотека языка Python — *matplotlib*. На рис. 11 представлены прогнозы на основе 12 моделей. Также приведен дополнительный график, демонстрирующий работу двух лучших моделей (рис. 12).

В ходе экспериментальной проверки работоспособности модели было выявлено, что атмосферное давление (P) не вносит значительного вклада в работу моделей и является одним из факторов, влияющих на переобучение моделей. В связи с этим данный параметр был исключен из результирующего списка входных характеристик.

В процессе исследования была подтверждена эффективность применения предикативных моделей для прогнозирования локальной гидродинамической обстановки у опоры моста равнинной реки. Полученные данные свидетельствуют о том, что такие модели могут быть успешно использованы для решения задач прогнозирования в условиях неопределенности и изменчивости природных процессов.

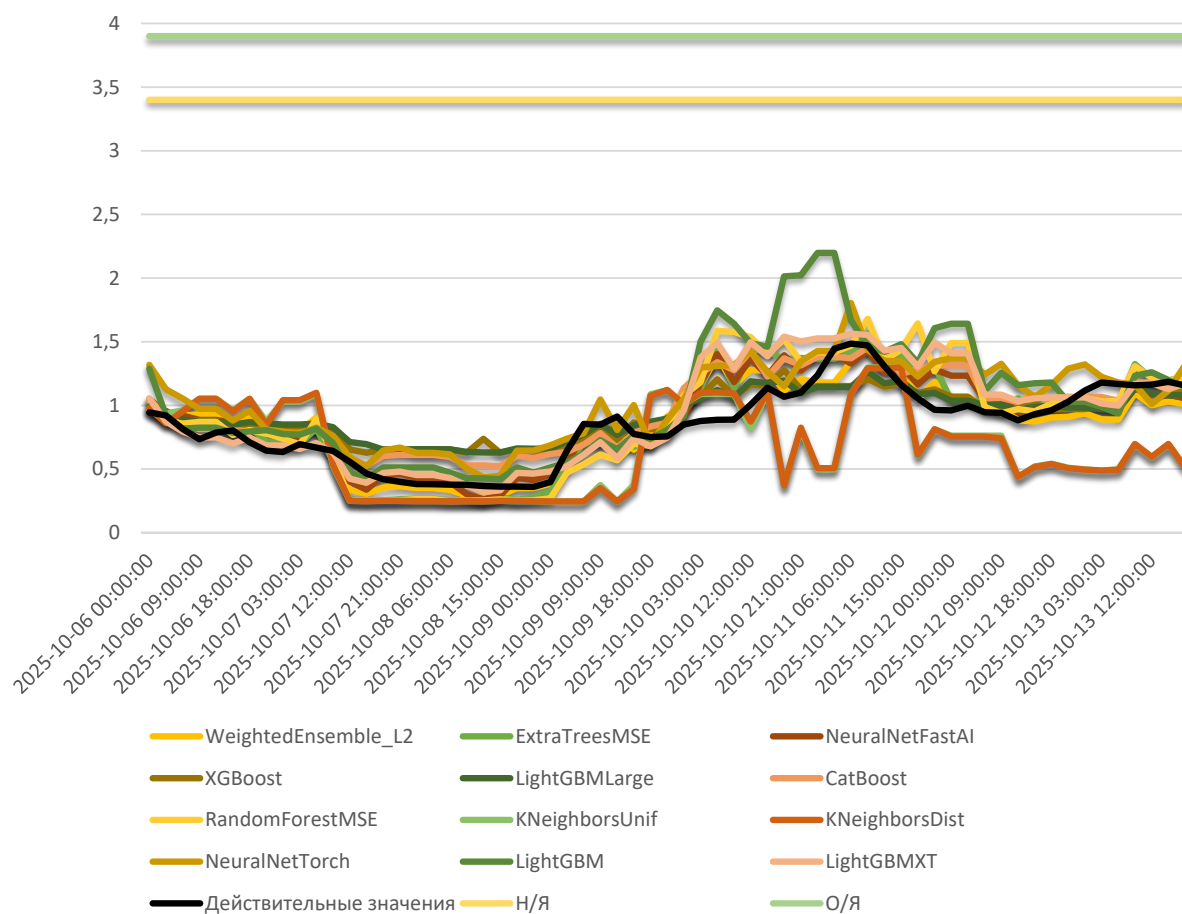


Рис. 11. Результат работы полученных ML-моделей на тестовых данных

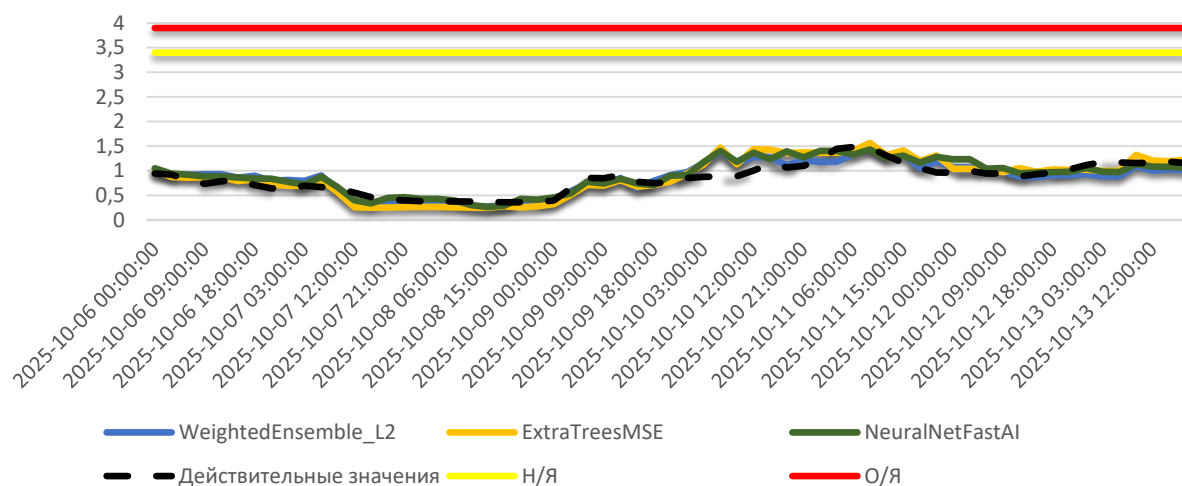


Рис. 12. Результат работы 2 лучших ML-моделей

Заключение

Проведенное исследование подтверждает реализуемость разработки предиктивных моделей для повышения надежности и безопасности транспортной инфраструктуры.

В условиях возрастающих вызовов, связанных с климатическими изменениями и техногенными рисками, традиционные методы принятия управленческих решений демонстрируют свою недостаточную эффективность.

В качестве решения данной проблемы в работе предложен подход, основанный на создании системы поддержки принятия решений, ядром которой является интеллектуальная имитационная модель для прогнозирования уровня воды в равнинных реках. Такой подход позволяет перейти от реактивного к упреждающему управлению, минимизируя материальные потери и риски для человеческих жизней.

Экспериментальная часть работы, выполненная с использованием фреймворка AutoGluon и данных по реке Темерник, продемонстрировала высокую эффективность методов машинного обучения для решения поставленной задачи. Было протестировано 12 моделей, среди которых наилучшие результаты по точности прогноза (наименьшие значения MSE, RMSE, MAE) показали модели NeuralNetFastAI и WeightedEnsemble_L2. Это доказывает, что объединение нескольких алгоритмов (ансамбли) и использование нейронных сетей позволяют достичь высокой достоверности прогнозов.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что разработанная методика и выбранные модели машинного обучения являются перспективным инструментом для интеграции в системы управления транспортной отраслью. Их внедрение позволит оптимизировать эксплуатацию инфраструктуры, разрабатывать эффективные планы действий в чрезвычайных ситуациях и в конечном итоге повысить устойчивость транспортной системы к негативным воздействиям природного характера. ▲

Список источников

1. Арефьева Е. В. Прогноз опасностей на основе постоянно действующей ситуационно-оптимизационной модели / Е. В. Арефьева, А. В. Рыбаков // Вестник КРСУ. — 2012. — Т. 12. — № 7. — С. 17–21.
2. Алагуджаева М. А. Гидрологическое цифровое прогнозное моделирование зон затопления территории Северного Казахстана на основе высокоточной цифровой модели рельефа / М. А. Алагуджаева, С. Р. Садвакасова, Б. Б. Елбасиева, А. А. Аимбетов // Гидрометеорология и экология. — 2023. — № 4. — С. 74–84. — DOI: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-74-84.
3. Shu X. Knowledge Discovery: Methods from Data Mining and Machine Learning / X. Shu, Y. Ye // Social Science Research. — 2023. — Vol. 110. — P. 102817. — DOI: 10.1016/j.ssresearch.2022.102817.
4. Долгих В. П. Краткосрочное прогнозирование водного режима рек и водохранилищ методом Брауна / В. П. Долгих, С. В. Рыбалка, И. С. Боблева // Экологический вестник Донбасса. — 2024. — № 2(12). — С. 10–15.
5. Цыганов В. В. Климатические риски железнодорожной инфраструктуры / В. В. Цыганов, В. А. Бородин, С. А. Савушкин, А. В. Лемешкова // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2024. — № 1(22)–2(23). — С. 51–57. — DOI: 10.47501/ITNOU.2024.1.51-57.
6. Восстановить разорванную нить: восстановление движения поездов до Мурманска // Мурманский вестник. — URL: <https://www.mvestnik.ru/our-home/vosstanovit-razorvannuyu-nity/> (дата обращения: 13.11.2025).
7. Обрушение моста // РИА «Воронеж». — URL: <https://riavr.ru/theme/obrushenie-mosta/> (дата обращения: 13.11.2025).
8. В Ростове-на-Дону на вокзале подтопило железнодорожные пути // ТАСС. — URL: <https://tass.ru/proisshествiya/21089611> (дата обращения: 13.11.2025).
9. Ермуханов Д. С. Машинное обучение и математика / Д. С. Ермуханов // Тенденции развития науки и образования. — 2024. — № 110-18. — С. 102–105. — DOI: 10.18411/trnio-06-2024-992.
10. Chicco D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman // PeerJ Computer Science. — 2021. — Vol. 7. — Pp. 1–24. — DOI: 10.7717/PEERJ-CS.623.
11. Пономаренко Т. С. Изучение гидрологических характеристик реки Темерник по результатам работы системы мониторинга «ЭМЕРСИТ» / Т. С. Пономаренко, А. В. Бреева // Экология и водное хозяйство. — 2021. — № 2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-gidrologicheskikh-harakteristik-reki-temernik-po-rezultatam-raboty-sistemy-monitoringa-emersit> (дата обращения: 30.10.2025).
12. Рашка С. Python и машинное обучение. Машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow-2 / С. Рашка, В. Мирджалили. — М.: Вильямс, 2020. — 848 с.
13. Мосин К. К. Использование методов автоматизированного машинного обучения для классификации дорожно-транспортных происшествий / К. К. Мосин, В. Э. Ковалевский, Н. А. Жукова // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2023. — № 2(34). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-avtomatizirovannogo-mashinnogo-obucheniya-dlya-klassifikatsii-dorozhno-transportnyh-proisshestviy> (дата обращения: 30.10.2025).
14. Feng K. RMSE-minimizing confidence intervals for the binomial parameter / K. Feng, L. M. Leemis, H. Sasinowska // Computational Statistics. — 2022. — Vol. 37. — Iss. 4. — Pp. 1855–1885. — DOI: 10.1007/s00180-021-01183-3.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 342–354
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-342-354

Predictive Modelling of Water Levels in Lowland Rivers to Enhance the Safety of Transport Infrastructure

Information about author

Mukonina M. I., Senior Lecturer. E-mail: mukonina_m@bk.ru

“Computer Technology and Automated Systems Control” Department, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

Abstract: The paper considers the task of improving the transport infrastructure safety through the development of an intelligent simulation model. The focus is on predicting the water levels in lowland rivers to prevent emergencies such as flooding, bridge collapses and other crises that could disrupt transportation networks. The relevance of this research is determined by a variety of factors, including the rise in climatic hazards such as floods and heavy rainfall, industrial threats, and the limited efficacy of traditional approaches to monitoring and forecasting hydrological conditions. The study involves an analysis of actual emergency incidents, which starkly illustrates the urgent need for timely water level predictions. The methodology for developing a decision support system is based on machine learning technologies. The experimental component of the research utilizes data from the Temernik river. A total of 12 machine learning models were evaluated with the objective of selecting the most accurate and efficient models for future forecasting applications. The models were subjected to rigorous statistical assessment using a variety of performance metrics. Following the analysis, the most effective models have been identified and recommended for subsequent deployment and use.

Keywords: transport infrastructure; emergencies; water level monitoring; intelligent simulation; decision support system; machine learning; water level predicting; AutoGluon; NeuralNetFastAI; WeightedEnsemble_L2; lowland rivers; risk management.

References

1. Aref'eva E. V., Rybakov A. V. Prognost opasnostey na osnove postoyanno deystvuyushchey situatsionno-optimizatsionnoy modeli [Forecast of hazards based on a continuously operating situational-optimization model]. *Vestnik KRSU* [Bulletin of KRSU]. 2012, Iss. 12(7), pp. 17–21. (In Russian)
2. Alagudzhayeva M. A., Sadvakasova S. R., Elbasieva B. B., Aimbetov A. A. Gidrologicheskoe tsifrovoe prognoznnoe modelirovanie zon zatopeniya territorii Severnogo Kazakhstana na osnove vysokodetal'noy tsifrovoy modeli rel'efa [Hydrological digital predictive modeling of flood zones in Northern Kazakhstan based on a high-resolution digital elevation model]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology]. 2023, Iss. 4, pp. 74–84. DOI: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-74-84. (In Russian)
3. Shu X., Ye Y. Knowledge Discovery: Methods from Data Mining and Machine Learning. *Social Science Research*. 2023, vol. 110, p. 102817. DOI: 10.1016/j.ssresearch.2022.102817.
4. Dolgikh V. P., Rybalka S. V., Bobleva I. S. Kratkosrochnoe prognozirovaniye vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch metodom Brauna [Short-term forecasting of river and reservoir water regimes using the Brown method]. *Ekologicheskiiy vestnik Donbassa* [Ecological Bulletin of Donbass]. 2024, Iss. 2(12), pp. 10–15. (In Russian)
5. Tsyganov V. V., Borodin V. A., Savushkin S. A., Lemeshkova A. V. Klimaticheskie riski zheleznodorozhnoy infrastruktury [Climatic risks to railway infrastructure]. *ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management]. 2024, Iss. 1(22)–2(23), pp. 51–57. DOI: 10.47501/ITNOU.2024.1.51-57. (In Russian)
6. Vosstanovit' razorvannuyu nit': vosstanovlenie dvizheniya poezdov do Murmansk [Restoring the broken thread: resuming train services to Murmansk]. *Murmanskiiy vestnik* [Murmansk Bulletin]. Available at: <https://www.mvestnik.ru/our-home/vosstanovit-razorvannuyu-nit/> (accessed: November 13, 2025). (In Russian)
7. Obrushenie mosta [Bridge collapse]. RIA “Voronezh”. Available at: <https://ria.ru/theme/obrushenie-mosta/> (accessed: November 13, 2025). (In Russian)
8. V Rostove-na-Donu na vokzale podtopilo zheleznodorozhnye puti [Railway tracks flooded at the station in Rostov-on-Don]. TASS. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/21089611> (accessed: November 13, 2025). (In Russian)
9. Ermukhanov D. S. Mashinnoe obucheniye i matematika [Machine learning and mathematics]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education]. 2024, Iss. 110-18, pp. 102–105. DOI: 10.18411/tmio-06-2024-992. (In Russian)
10. Chicco D., Warrens M. J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*. 2021, vol. 7, pp. 1–24. DOI: 10.7717/PEERJ-CS.623.
11. Ponomarenko T. S., Breeva A. V. Izucheniye gidrologicheskikh kharakteristik reki Temernik po rezul'tatam raboty sistemy monitoringa “EMERSIT” [Studying the hydrological characteristics of the Temernik River based on the results of the “EMERSIT” monitoring system]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management]. 2021, Iss. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izucheniye-gidrologicheskikh-kharakteristik-reki-temernik-po-rezultatam-raboty-sistemy-monitoringa-emersit> (accessed: October 30, 2025). (In Russian)
12. Rashka S., Mirdzhalili V. *Python i mashinnoe obucheniye. Mashinnoe i glubokoe obucheniye s ispol'zovaniem Python, scikit-learn i TensorFlow-2* [Python and machine learning. Machine and deep learning using Python, scikit-learn and TensorFlow-2]. Moscow: Vil'yams Publ., 2020, 848 p. (In Russian)
13. Mosin K. K., Kovalevskiy V. E., Zhukova N. A. Ispol'zovanie metodov avtomatizirovannogo mashinnogo obucheniya dlya klassifikatsii dorozhno-transportnykh proisshestviy [Using automated machine learning methods for classifying road traffic accidents]. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies in Transport]. 2023, Iss. 2(34). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-avtomatizirovannogo-mashinnogo-obucheniya-dlya-klassifikatsii-dorozhno-transportnykh-proisshestviy> (accessed: October 30, 2025). (In Russian)
14. Feng K., Leemis L. M., Sasinowska H. RMSE-minimizing confidence intervals for the binomial parameter. *Computational Statistics*. 2022, vol. 37, Iss. 4, pp. 1855–1885. DOI: 10.1007/s00180-021-01183-3.

УДК 681.518.5 + 004.052.32

МЕТОД СИНТЕЗА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕСТЕРОВ КОМПОЗИЦИИ ДВУХ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПО ВСЕМ РАЗРЯДАМ ПАРАМИ КОМБИНАЦИЙ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИЧНЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович, д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной Академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники, профессор^{1, 2, 3, 4}, ведущий научный сотрудник⁵; e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ЕЛИНА Есения Игоревна, аспирант²; e-mail: eseniya-elina@mail.ru

НКУНГУ Томаш Мавунгу, аспирант¹; e-mail: tomasmavungu2018@gmail.com

ЛЕСКОВЕЦ Игорь Вадимович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой⁶; e-mail: le@bru.by

ГЕБЕЛЬ Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент¹; e-mail: gebel_es@spbstu.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа управления кибер-физическими системами, Институт компьютерных наук и кибербезопасности, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербург

³Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Москва

⁴Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Автоматика и телемеханика», Ташкент

⁵Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, лаборатория проблем организации транспортных систем (лаборатория № 5), Санкт-Петербург

⁶Белорусско-Российский университет, кафедра «Транспортные и технологические машины», Могилев

Рассматривается задача совершенствования методов синтеза самопроверяемых дискретных устройств для систем автоматического управления на основе композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам парами комбинаций. Предложен метод синтеза быстродействующих тестеров композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам парами комбинаций. Он подразумевает построение тестера на основе детекторов двух равновесных кодов, построенных с применением свойств симметричных булевых функций. Установлены зависимости, позволяющие определить значения показателя сложности технической реализации тестера композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам парами комбинаций для любой длины кодовых слов. Приводятся некоторые свойства и особенности синтезируемых тестеров. Показано, каким образом синтезируются тестеры для композиции произвольного числа равновесных кодов на основе разработанного метода. Результаты исследования могут быть использованы при построении высоконадежных и безопасных дискретных устройств на различной элементной базе.

Ключевые слова: самопроверяемое дискретное устройство; композиция двух равновесных кодов; симметричная булева функция; синтез тестера композиции равновесных кодов; показатели эффективности тестеров.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-355-368

▼ Введение

Синтезу самопроверяемых дискретных устройств для систем автоматического управления посвящены тысячи публикаций ученых всего мира. Задача построения устройства, наделенного свойством обнаружения собственных неисправностей и ошибок в вычислениях в процессе функционирования, важна

по той причине, что ее решение позволяет создавать такие устройства, в которых не накапливаются неисправности, а неверно вычисленные данные своевременно фиксируются и блокируются для исключения нарушений в управляющих алгоритмах [1–3].

При синтезе самопроверяемых дискретных устройств применяются методы теории

информации и кодирования, а также булевой алгебры. Для наделения устройства свойством самопроверяемости требуется внесение избыточности по определенным правилам в его структуру либо же использование внешней схемы встроенного контроля. Например, устройство может быть реализовано с контролепригодной по тому или иному диагностическому признаку структурой и снабжено тестером для контроля этого признака [4–7]. Другим вариантом организации контроля вычислений служит способ, связанный с анализом сигналов, формируемых на выходах дискретного устройства, в схеме встроенного контроля и их дополнением и/или коррекцией для формирования контролепригодных по выбранному диагностическому признаку сигналов [8–10]. Часто применяют контроль вычислений по принадлежности кодовых слов какому-либо заранее выбранному равномерному блоковому коду и формируемых булевых функций установленному особому классу булевых функций. Можно выделить следующие хорошо известные монографии, раскрывающие основные методы построения самопроверяемых дискретных устройств [11–19].

Исследования авторов привели к изучению новых методов синтеза самопроверяемых дискретных устройств на основе особого класса равномерных блоковых кодов, формируемых при использовании сразу же двух равновесных кодов [20]. В качестве таких кодов используются равновесные коды « r из n » и « $(n - r)$ из n », или r/n и $(n - r)/n$ коды, где n — длина

кодовых слов, а $r \in \left\{1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right\}$ — вес кодового

слова. Анализ научной литературы показал отсутствие эффективных методов синтеза тестеров для них. Многие методы, используемые для построения тестеров отдельных равновесных кодов [21–23], ввиду их особенностей не удастся применять при синтезе тестеров для их композиций.

Статья посвящена методу синтеза тестеров r/n и $(n - r)/n$ кодов, предложенному авторами. В его основе лежит использование класса симметричных булевых функций [24].

1. Композиции равновесных кодов

Рассматриваемый класс равномерных блоковых кодов, основанный на использовании двух подмножеств кодовых слов различных равновесных кодов с одинаковой длиной кодовых слов, предложен в [20]. Такие коды названы композициями двух равновесных кодов. Их можно эффективно использовать при синтезе самопроверяемых дискретных устройств.

При построении композиций r/n и $(n - r)/n$ кодов существует ограничение, связанное с тем, что значения r и $(n - r)$ должны различаться как минимум на двойку. В противном случае код не будет обнаруживать некоторую долю одиночных ошибок в кодовых словах, что не позволит во многих случаях использовать его при построении самопроверяемых устройств.

Число кодовых слов в композиции двух равновесных кодов определяется суммой биномиальных коэффициентов $C_n^r + C_n^{n-r} = 2C_n^r$. Чем больше значение r , тем больше мощность множества кодовых слов композиции двух равновесных кодов, но тем больше и потенциальных ошибок в кодовых словах не будет обнаруживаться.

На рис. 1 представлен фрагмент треугольника Паскаля [25, 26], где биномиальные коэффициенты заменены на обозначения равновесных кодов и выделены все пары композиций двух равновесных кодов, которые могут быть построены для первых значений n .

Важнейшим свойством композиции r/n и $(n - r)/n$ кодов является то, что ее кодовые слова могут быть разбиты на пары ортогональных по всем разрядам комбинаций. Это свойство можно эффективно использовать при синтезе самопроверяемых дискретных устройств с контролем вычислений одновременно и по принадлежности кодовых слов выбранной композиции r/n и $(n - r)/n$ кодов, и по принадлежности формируемых в схемах встроенного контроля булевых функций классу самодвойственных [20]. Поэтому данный класс кодов крайне интересен для рассмотрения при решении задач синтеза самопроверяемых дискретных устройств.

Отметим, что на треугольнике Паскаля не выделены композиции равновесных кодов вида $0/n$ и n/n , так как множества их кодовых

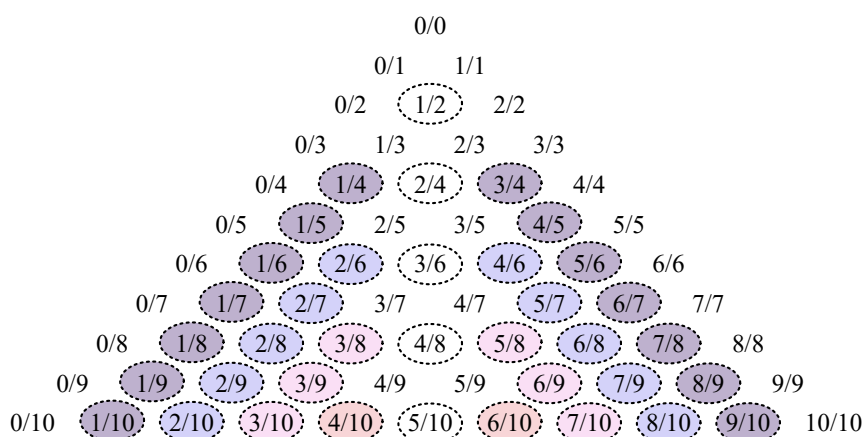


Рис. 1. Фрагмент треугольника Паскаля

слов содержат всего два кодовых слова, что не позволяет использовать такие композиции для построения самопроверяемых дискретных устройств. Кроме того, на вертикали отдельно отмечены одиночные равновесные коды, обладающие таким же свойством, как и композиции выделенных двух равновесных кодов. Их использованию при синтезе самопроверяемых дискретных устройств посвящены некоторые публикации, например [27–30].

Для изучения свойств композиций r/n и $(n-r)/n$ кодов рекомендуем обратиться к статье [20], после чего перейдем к описанию одного из методов синтеза тестеров для них.

2. Принципы синтеза тестера композиции равновесных кодов

При реализации тестера композиции r/n и $(n-r)/n$ кодов можно использовать симметричные булевы функции [31]. Симметричная булева функция $s_p(x_1, x_2, \dots, x_t)$ — это функция, значение которой не зависит от перестановки аргументов, а зависит только от количества p единичных аргументов.

Ниже приведены симметричные функции от t аргументов:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 1, \\ \tau_1 &= x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_t, \\ \tau_2 &= x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee \dots \vee x_{t-1} x_t, \\ &\dots \\ \tau_t &= x_1 x_2 \cdot \dots \cdot x_t, \\ \tau_{t+1} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Хорошо известно такое положение [31].

Теорема 1. Любая симметричная булева функция $s_p(x_1, x_2, \dots, x_t)$ может быть представлена в виде:

$$s_p(x_1, x_2, \dots, x_t) = \tau_p \overline{\tau_{p+1}}. \quad (2)$$

Тестер композиции r/n и $(n-r)/n$ кодов может быть синтезирован следующим образом (рис. 2).

Фактически берется тестер, реализуемый на основе двух детекторов равновесных кодов вида r/n и $(n-r)/n$ — устройств $r/n-DET$ и $(n-r)/n-DET$. Каждый детектор имеет по одному выходу, описываемому формулой (2). На выходе устанавливается единичное значение при поступлении кодового слова, принадлежащего соответствующему коду. Если на входы поступает кодовое слово, не принадлежащее ни одному из кодов r/n и $(n-r)/n$, то на выходах фиксируется непарафазный сигнал $\langle 00 \rangle$. Комбинация $\langle 11 \rangle$, таким образом, вовсе при нормальном функционировании тестера не формируется, а появляется лишь при неисправностях самого тестера.

Тестер композиции r/n и $(n-r)/n$ кодов по структуре рис. 2 синтезируется в соответствии со следующей системой булевых функций:

$$\begin{cases} z^0(X) = s_r(X) = \tau_r \overline{\tau_{r+1}}, \\ z^1(X) = s_{n-r}(X) = \tau_{n-r} \overline{\tau_{n-r+1}}. \end{cases} \quad (3)$$

Литерой X здесь и далее обозначен вектор наборов значений аргументов.

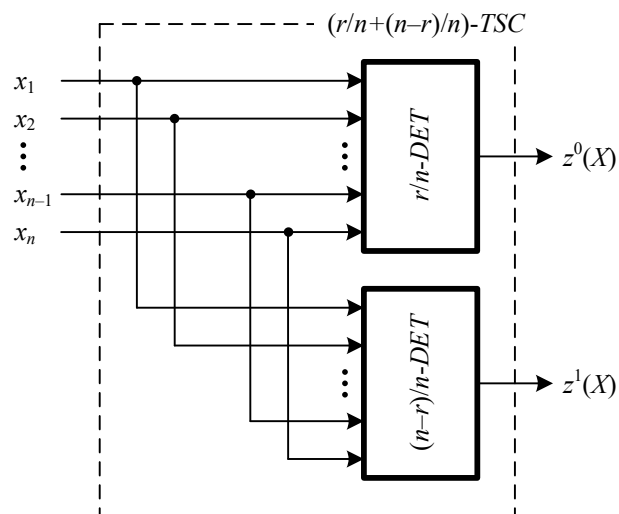


Рис. 2. Общая структура тестера композиции кодов r/n и $(n-r)/n$

Формулы (3) непосредственно следуют из формулы (2) и принципа построения тестера композиции двух равновесных кодов (см. рис. 2).

С учетом (3) тестер композиции $1/n$ и $(n-1)/n$ кодов будет иметь структуру, представленную на рис. 3, а композиции r/n и $(n-r)/n$ кодов при $r \geq 2$ — представленную на рис. 4.

Для понимания состава элементов в структурах, изображенных на рис. 3 и 4, приведем пример использования формулы (3) для формирования описания тестеров композиции равновесных кодов $1/n$ и $(n-1)/n$, а также $2/n$ и $(n-2)/n$ при $n = 6$:

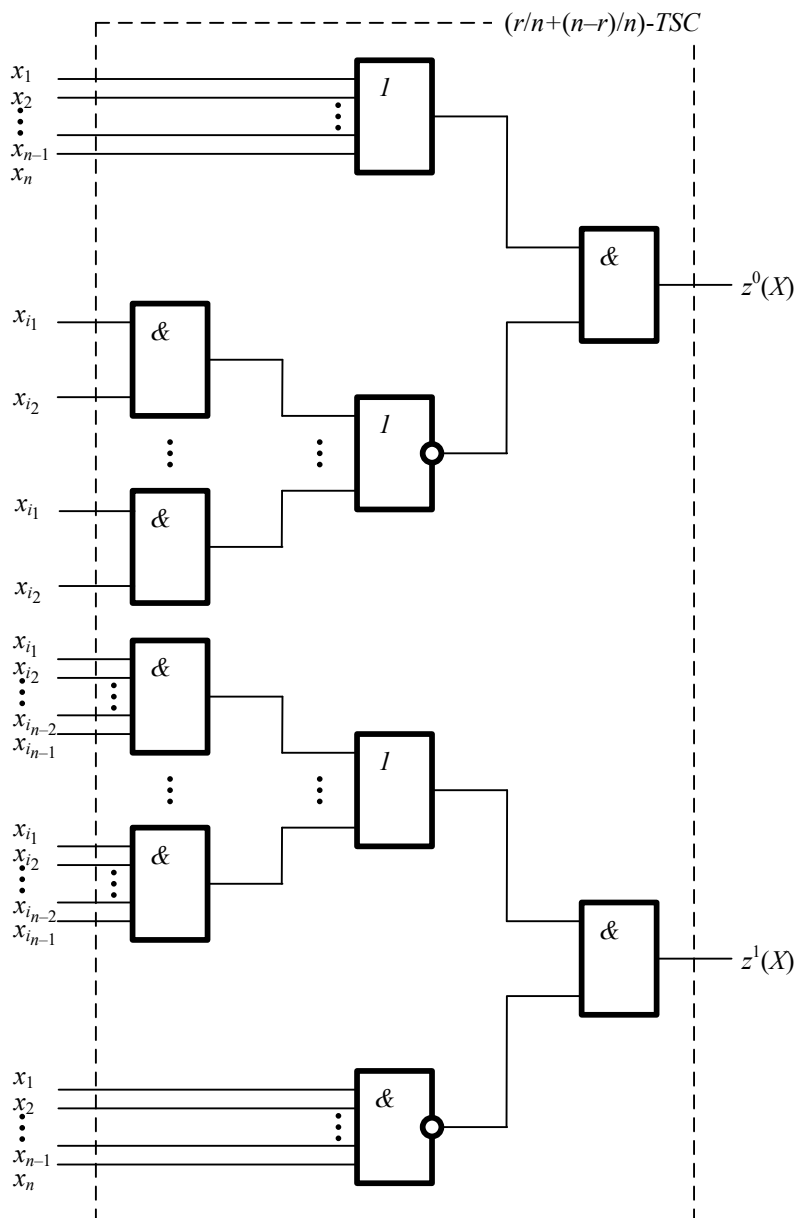


Рис. 3. Структура тестера композиции кодов $1/n$ и $(n-1)/n$, синтезированного по системе формул (3)

$$\begin{cases} z^0(X) = s_1(X) = \tau_1 \tau_2 = (x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_6) \overline{x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee \dots \vee x_5 x_6}, \\ z^1(X) = s_5(X) = \tau_5 \tau_6 = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 \vee \dots \vee x_2 x_3 x_4 x_5 x_6) \overline{x_1 x_2 \dots x_5 x_6}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} z^0(X) = s_2(X) = \tau_2 \tau_3 = (x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee \dots \vee x_5 x_6) \overline{x_1 x_2 x_3 \vee x_1 x_2 x_4 \vee \dots \vee x_4 x_5 x_6}, \\ z^1(X) = s_4(X) = \tau_4 \tau_5 = (x_1 x_2 x_3 x_4 \vee x_1 x_2 x_3 x_5 \vee \dots \vee x_3 x_4 x_5 x_6) \overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 \vee \dots \vee x_2 x_3 x_4 x_5 x_6}. \end{cases}$$

Читатель может обратить внимание на обозначения на входах элементов в структурах рис. 3 и 4.

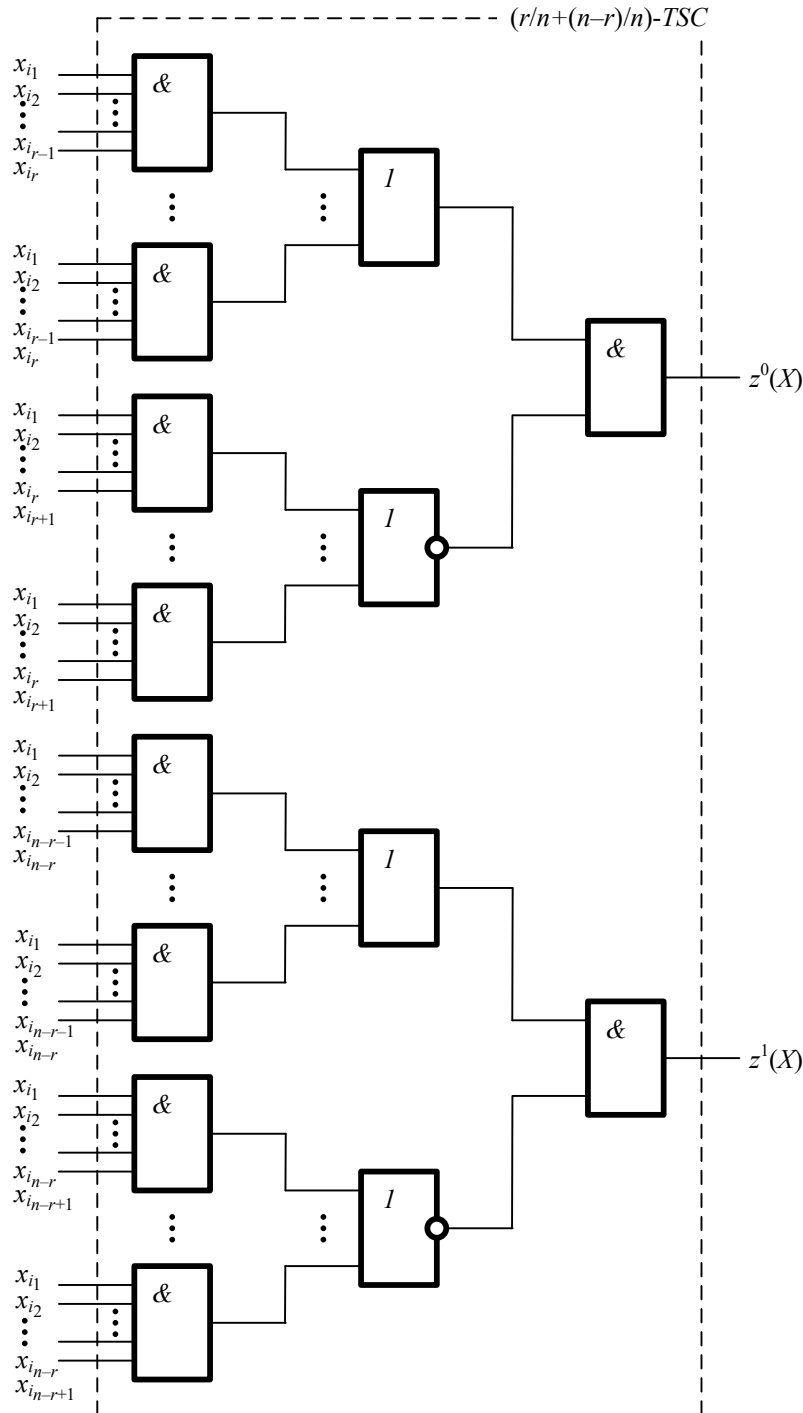


Рис. 4. Структура тестера композиции кодов r/n и $(n-r)/n$ при $r \geq 2$, синтезированного по системе формул (3)

На рис. 3 на каскаде реализации подфункции τ_2 используются двухвходовые элементы AND. Их количество равно C_n^2 , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$. Аналогично на том же каскаде, но для реализации подфункции τ_5 используются $(n-1)$ -входовые элементы AND. Их количество равно C_n^{n-1} , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n-2}}, x_{i_{n-1}} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$.

На рис. 4 использованы аналогичные обозначения. На каскаде реализации подфункции τ_r используются r -входовые элементы AND. Их количество равно C_n^r , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{r-1}}, x_{i_r} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$. Аналогично на том же каскаде, но для реализации функции подфункции τ_{r+1} используются $(r+1)$ -входовые элементы AND. Их количество равно C_n^{r+1} , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_r}, x_{i_{r+1}} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$. На том же каскаде для реализации подфункции τ_{n-r} используются $(n-r)$ -входовые элементы AND. Их количество равно C_n^{n-r} , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n-r-1}}, x_{i_{n-r}} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$. И, наконец, на том же каскаде, но для реализации подфункции τ_{n-r+1} используются $(n-r+1)$ -входовые элементы AND. Их количество равно C_n^{n-r+1} , а переменные $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n-r}}, x_{i_{n-r+1}} \in \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$.

Утверждение 1. Тестер, реализуемый по системе формул (3) на логических элементах с произвольным числом входов, будет иметь три уровня.

Справедливость утверждения 1 следует из анализа формул (3) и входящих в них формул (1). Утверждение 1 фактически характеризует быстроедействие тестера.

3. Оценка показателя сложности технической реализации тестера композиции равновесных кодов

Определим показатель сложности технической реализации тестера, построенного по системе (3). Будем оценивать сложность по числу входов внутренних элементов.

В сомножитель τ_r в функции $z^0(X)$ входит C_n^r конъюнкций длины r . Для реализации этой части схемы тестера потребуется C_n^r r -входовых элементов AND и один C_n^r -входовой элемент OR (при условии $r \geq 2$; при $r = 1$ потребуется один C_n^r -входовой элемент OR). В сомножитель же τ_{r+1} входит C_n^{r+1}

конъюнкций длины $r+1$. Для реализации указанной части схемы тестера потребуется C_n^{r+1} $(r+1)$ -входовых элементов AND и один C_n^{r+1} -входовой элемент NOR. В сомножитель τ_{n-r} в функции $z^1(X)$ входит C_n^{n-r} конъюнкций длины $n-r$. Для реализации выделенной подсхемы тестера потребуется C_n^{n-r} $(n-r)$ -входовых элементов AND и один C_n^{n-r} -входовой элемент OR. В сомножитель τ_{n-r+1} же входит C_n^{n-r+1} конъюнкций длины $n-r+1$. Для реализации данной подсхемы тестера потребуется C_n^{n-r+1} $(n-r+1)$ -входовых элементов AND и один C_n^{n-r+1} -входовой элемент NOR (при условии $r \geq 2$; при $r = 1$ потребуется один C_n^{n-r+1} -входовой элемент NAND). Помимо обозначенных элементов потребуется два двухвходовых элемента AND для реализации логических произведений в каждой из формул из (3).

Показатель сложности при $r = 1$ можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned} L_{n,1} &= C_n^1 + 3C_n^2 + ((n-1)C_n^{n-1} + C_n^{n-1}) + \\ &+ nC_n^n + 4 = n + \frac{3n(n-1)}{2} + n^2 + n + 4 = \\ &= n^2 + 2n + \frac{3n(n-1)}{2} + 4 = \frac{5}{2}n^2 + \frac{n}{2} + 4. \end{aligned} \quad (4)$$

Показатель сложности при $r \geq 2$ рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} L_{n,r} &= (rC_n^r + C_n^r) + ((r+1)C_n^{r+1} + C_n^{r+1}) + \\ &+ ((n-r)C_n^{n-r} + C_n^{n-r}) + ((n-r+1)C_n^{n-r+1} + C_n^{n-r+1}) + \\ &+ 4 = (r+1)C_n^r + (r+2)C_n^{r+1} + (n-r+1)C_n^{n-r} + \\ &+ (n-r+2)C_n^{n-r+1} + 4. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом того, что $C_n^{n-r} = C_n^r$ и $C_n^{n-r+1} = C_n^{r-1}$, преобразуем (5):

$$L = (n+2)C_n^r + (r+2)C_n^{r+1} + (n-r+2)C_n^{r-1} + 4. \quad (6)$$

Учтем такие соотношения, легко проверяемые при вычислениях:

$$\begin{aligned} C_n^r &= \frac{n-r+1}{r} C_n^{r-1}, \\ C_n^{r+1} &= \frac{(n-r+1)(n-r)}{r(r+1)} C_n^{r-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Пользуясь (7), преобразуем (6):

$$\begin{aligned}
 L_{n,r} &= (n+2) \frac{n-r+1}{r} C_n^{r-1} + \\
 &+ (r+2) \frac{(n-r+1)(n-r)}{r(r+1)} C_n^{r-1} + (n-r+2) C_n^{r-1} + 4 = \\
 &= C_n^{r-1} \left((n+2) \frac{n-r+1}{r} + \frac{(r+2)(n-r+1)(n-r)}{r(r+1)} + \right. \\
 &\left. + (n-r+2) \right) + 4 = C_n^{r-1} \frac{1}{r(r+1)} \times \\
 &\times (n^2(2r+3) + n(5-2r^2) + 2) + 4. \quad (8)
 \end{aligned}$$

К примеру, при $n = 6$ и $r = 2$ формула (8) дает следующий результат:

$$\begin{aligned}
 L_{6,2} &= C_6^{2-1} \frac{1}{2(2+1)} (6^2(2 \cdot 2 + 3) + 6(5 - 2 \cdot 2^2) + \\
 &+ 2) + 4 = 6 \frac{1}{6} (36 \cdot 7 - 6 \cdot 3 + 2) + 4 = 240.
 \end{aligned}$$

В табл. 1 приведены рассчитанные значения показателей сложности реализации

тестеров по формулам (4) и (8) в выбранной метрике.

Рассмотрим значения показателей сложности реализации для тестеров композиций равновесных кодов, отличающихся значением n на единицу, и определим, во сколько раз возрастает сложность тестера с ростом значения n :

$$\zeta_{n,r} = \frac{L_{n+1,r}}{L_{n,r}}. \quad (9)$$

В табл. 2 внесены рассчитанные по формуле (9) значения показателя $\zeta_{n,r}$. Для наглядности графики зависимости значения показателя $\zeta_{n,r}$ получающиеся с ростом значения n при фиксации r , представлены на рис. 5.

По данным табл. 2 и графикам рис. 5 прослеживается закономерность.

Утверждение 2. С ростом значения n вне зависимости от значения r значение показателя $\zeta_{n,r}$ приближается к единице:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \zeta_{n,r} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{L_{n+1,r}}{L_{n,r}} = 1.$$

Таблица 1. Значения показателя сложности реализации тестеров композиций равновесных кодов r/n и $(n-r)/n$ кодов

n	r					
	1	2	3	4	5	6
4	46	—	—	—	—	—
5	69	—	—	—	—	—
6	97	240	—	—	—	—
7	130	382	—	—	—	—
8	168	572	1110	—	—	—
9	211	817	1846	—	—	—
10	259	1124	2899	4996	—	—
11	312	1500	4349	8551	—	—
12	370	1952	6285	13 886	22 015	—
13	433	2487	8805	21 597	38 471	—
14	501	3112	12 016	32 400	64 068	95 528
15	574	3834	16 034	47 142	102 470	169 602
16	652	4660	20 984	66 812	158 344	288 084
17	735	5597	27 000	92 552	237 528	471 176
18	823	6652	34 225	125 668	347 212	745 828
19	916	7832	42 811	167 641	496 132	1 147 300
20	1014	9144	52 919	220 138	694 777	1 720 948
21	1117	10 595	64 719	285 023	955 609	2 524 249
22	1225	12 192	78 390	364 368	1 293 296	3 629 080
23	1338	13 942	94 120	460 464	1 724 958	5 124 266
24	1456	15 852	112 106	575 832	2 270 426	7 118 412
25	1579	17 929	132 554	713 234	2 952 514	9 743 034

Таблица 2. Значения показателя $\zeta_{n,r}$

n	r					
	1	2	3	4	5	6
5	1,5	—	—	—	—	—
6	1,4058	—	—	—	—	—
7	1,34021	1,59167	—	—	—	—
8	1,29231	1,49738	—	—	—	—
9	1,25595	1,42832	1,66306	—	—	—
10	1,22749	1,37576	1,57042	—	—	—
11	1,20463	1,33452	1,50017	1,71157	—	—
12	1,1859	1,30133	1,44516	1,6239	—	—
13	1,17027	1,27408	1,40095	1,55531	1,74749	—
14	1,15704	1,25131	1,36468	1,50021	1,66536	—
15	1,14571	1,23201	1,33439	1,455	1,59939	1,77542
16	1,13589	1,21544	1,30872	1,41725	1,54527	1,69859
17	1,1273	1,20107	1,28669	1,38526	1,50008	1,63555
18	1,11973	1,18849	1,26759	1,35781	1,46177	1,58291
19	1,113	1,17739	1,25087	1,334	1,4289	1,53829
20	1,10699	1,16752	1,23611	1,31315	1,40039	1,5
21	1,10158	1,15868	1,22298	1,29475	1,37542	1,46678
22	1,09669	1,15073	1,21124	1,27838	1,35337	1,43769
23	1,09224	1,14354	1,20066	1,26373	1,33377	1,412
24	1,08819	1,137	1,1911	1,25055	1,31622	1,38916
25	1,08448	1,13102	1,1824	1,23861	1,30042	1,36871

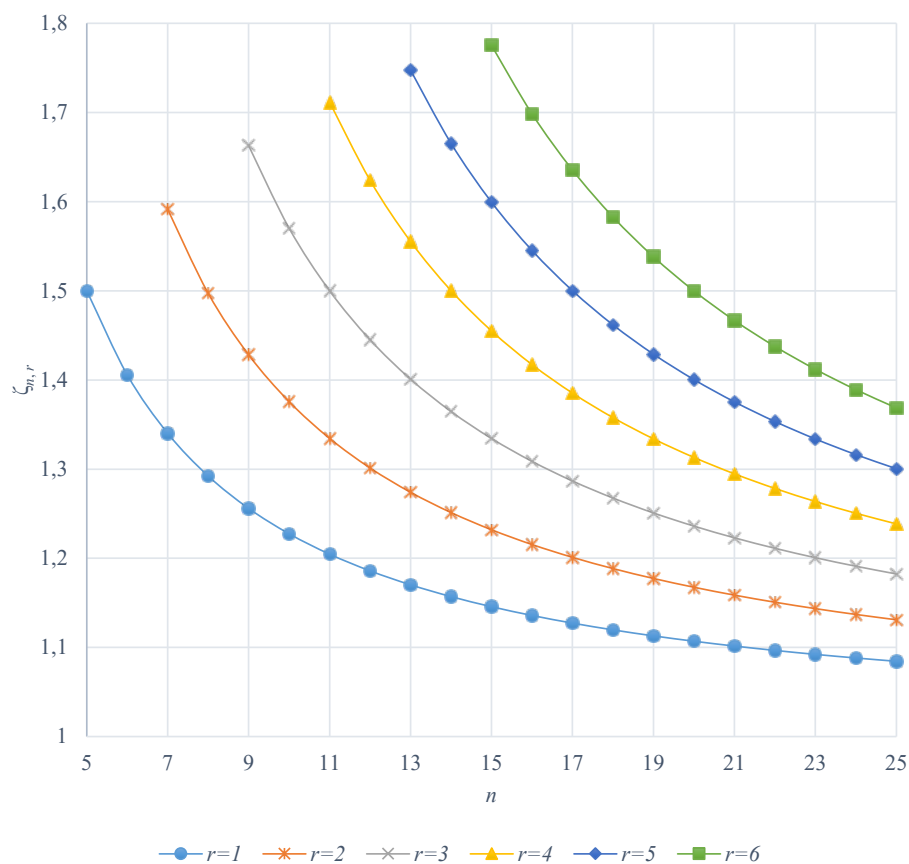


Рис. 5. Значения показателя $\zeta_{n,r}$ для фиксированных значений r

Утверждение 2 доказывается с использованием (4) и (8) путем довольно простых математических выкладок.

4. О проблеме самопроверяемости

Особенностью тестеров, реализуемых по предложенному методу, является то, что при нормальном функционировании оказывается невозможным формирование тестов для некоторых внутренних точек их структур. Рассмотрим неисправности вида «константа 0» и «константа 1» на каждой из внутренних линий тестеров и определим, при каких условиях осуществляется их тестирование. Хорошо известно, например, из [32], что можно рассматривать не все контрольные точки на линиях схем, а только одну из эквивалентных и все импликантные наиболее удаленных точек от выходных каскадов схем. Методика выделения таких точек описана в [33] (см. стр. 191 данного источника). Однако здесь мы рассмотрим общие вопросы тестируемости элементов в структурах тестеров и покажем, за счет каких особенностей тестеров не получается формировать все комбинации проверяющего теста для их структур.

Теорема 2. *Для полной проверки тестера композиции кодов $1/n$ и $(n-1)/n$ необходимо помимо множества кодовых слов, принадлежащих данной композиции, использовать также кодовые комбинации $\langle 00...00 \rangle$ и $\langle 11...11 \rangle$.*

Доказательство. Рассмотрим структуру тестера, приведенную на рис. 3. Обратим внимание на логический элемент OR, реализующий подфункцию τ_1 . Неисправности вида «константа 0» на его входах тестируются при подаче на входы комбинаций, входящих во множество кодовых слов $1/n$ кода. Однако неисправности вида «константа 1» требуют подачи на входы вектора вида $\langle 00...00 \rangle$. Этот вектор не входит ни в одно из множеств кодовых слов $1/n$ и $(n-1)/n$ кодов. Эта же особенность говорит о том, что не удастся тестировать неисправности вида «константа 1» на входах и выходе этого элемента, так как требуется сформировать нулевое значение, а при нормальном функционировании на входы тестера поступают лишь комбинации из множеств кодовых слов $1/n$ и $(n-1)/n$ кодов. Проблему тестируемости неисправностей

на входах элемента можно было бы решить использованием нескольких элементов OR с меньшим числом входов, однако все равно неисправность вида «константа 1» в точке выхода последнего элемента OR проверить не удастся.

Описанной выше проблемы нет для элемента NOR, реализующего подфункцию $\overline{\tau_2}$. При нормальном функционировании поступление кодовых слов равновесного кода $1/n$ обращает в ноль значения на выходах каждого элемента AND предыдущего каскада, а поступление кодовых слов $(n-1)/n$ кода приводит к обращению части значений на выходах элемента AND в единицу, а части — в ноль. Используется полное множество кодовых слов $(n-1)/n$ кода, что позволяет сформировать нули и единицы для каждого из элементов AND.

Во второй подсхеме при реализации функции τ_{n-1} рассматриваемой проблемы нет, так как в нули обращаются все выходы элементов AND предыдущего элементу OR каскада при подаче на входы комбинаций из множества кодовых слов кода $1/n$. Но появляется проблема тестирования неисправностей на линиях до и после элемента NAND, реализующего функцию $\overline{\tau_n}$. Невозможно подать комбинацию $\langle 11...11 \rangle$, что не дает возможности тестирования неисправностей вида «константа 0» на входах и выходах элемента. ■

Аналогичные рассуждения касаются и структуры тестера композиции кодов r/n и $(n-r)/n$.

Теорема 3. *Для полной проверки тестера композиции кодов r/n и $(n-r)/n$ необходимо помимо множества кодовых слов, принадлежащих данной композиции, использовать также кодовую комбинацию $\langle 00...00 \rangle$.*

Доказательство. Оно аналогично доказательству теоремы 3. Анализ структуры рис. 4 в части реализации подфункций τ_r и τ_{r+1} также говорит о необходимости использования для ее полной проверки тестовой комбинации $\langle 00...00 \rangle$. Однако нет проблем с тестируемостью элементов во второй подсхеме реализации подфункций τ_{n-r} и τ_{n-r+1} , поскольку нулевые значения на каждом из элементов AND предыдущего каскада к элементам OR и NOR формируются при подаче на входы кодовых слов кода r/n . ■

Практическим выводом является то, что тестеры, синтезируемые по предложенному методу, не являются полностью самопроверяемыми и при их использовании существует ограничение в виде необходимости кратковременного отключения их от работы с целью подачи на входы недостающих комбинаций для полной проверки. Однако такая проблема отпадает при высоконадежной реализации структур тестеров, например по методам [34, 35] или на элементах с высокими показателями надежности.

5. Тестеры других композиций равновесных кодов

В [20] отмечается, что помимо рассматриваемых композиций равновесных кодов могут быть образованы и другие композиции из четного числа равновесных кодов для заданного значения n . Такие коды можно построить для $n \geq 8$. При построении тестеров для них также можно использовать свойства симметричных булевых функций.

Для синтеза тестеров композиций четного числа равновесных кодов требуется разбить множество кодовых слов на два непересекающихся подмножества

$$\Omega = \Omega^1 \cup \Omega^2, \quad \Omega^1 \cap \Omega^2 = \emptyset, \quad (10)$$

и для каждого из них построить детектор.

Удобно разбиение делать по подмножествам кодовых слов отдельных равновесных кодов. На рис. 6 изображена обобщенная структура тестеров композиций четырех равновесных кодов. Кодовые слова кодов вида r_1/n и r_2/n образуют подмножество Ω^1 , а кодов вида $(n-r_1)/n$ и $(n-r_2)/n$ — подмножество Ω^2 . Выходы детекторов кодов вида r_1/n и r_2/n , а также кодов вида $(n-r_1)/n$ и $(n-r_2)/n$ объединяются на входах двухвходовых элементов OR. Их выходы являются контрольными выходами $z^0(X)$ и $z^1(X)$ тестера.

Тестер композиции r_1/n , r_2/n , $(n-r_1)/n$ и $(n-r_2)/n$ кодов реализуется по следующим формулам:

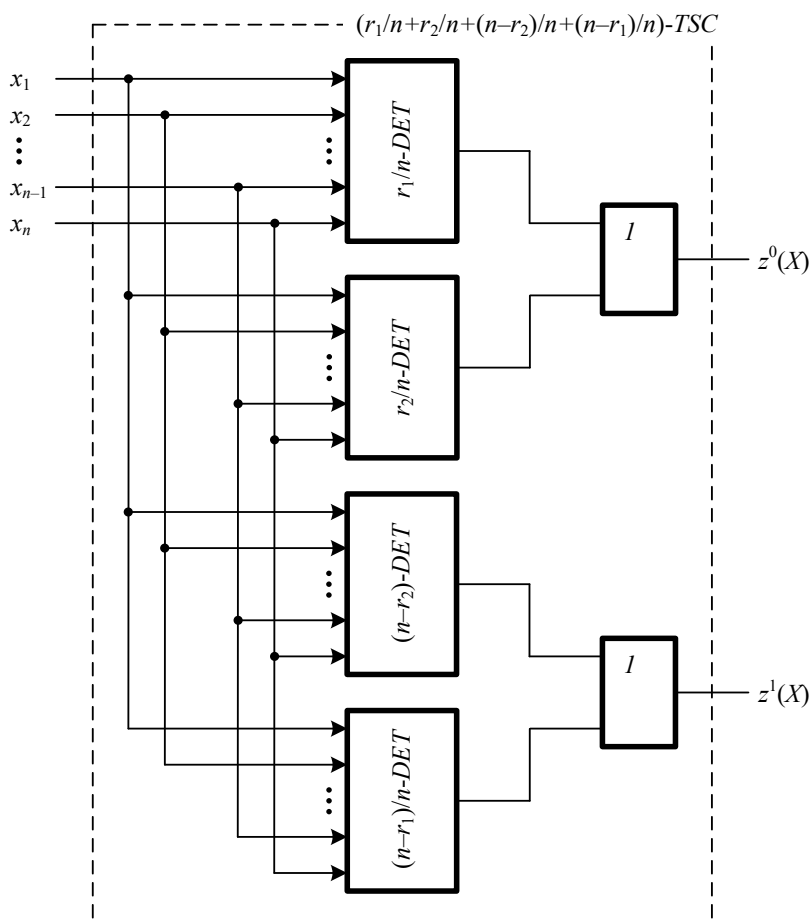


Рис. 6. Структура тестеров композиций четырех равновесных кодов

$$\begin{cases} z^0(X) = s_{r_1}(X) \vee s_{r_2}(X) = \tau_{r_1} \overline{\tau_{r_1+1}} \vee \tau_{r_2} \overline{\tau_{r_2+1}}, \\ z^1(X) = s_{n-r_1}(X) \vee s_{n-r_2}(X) = \tau_{n-r_1} \overline{\tau_{n-r_1+1}} \vee \tau_{n-r_2} \overline{\tau_{n-r_2+1}}. \end{cases} \quad (11)$$

Отметим, что реализация тестера по формулам (11) приводит к тому, что показатели реализации подсхем вычисления значений функций $z^0(X)$ и $z^1(X)$ становятся равными. Структура тестера схожа со структурой сбалансированного древовидного графа.

Утверждение 3. Тестер, реализуемый по системе формул (11) на логических элементах с произвольным числом входов, будет иметь четыре уровня.

В самом деле, в соответствии со структурой рис. 2 и утверждением 1 подсхемы реализации детекторов кодов вида r_1/n и r_2/n , а также кодов вида $(n - r_1)/n$ и $(n - r_2)/n$ будут иметь три уровня. На четвертом уровне расположены двухвходовые элементы OR.

Можно обобщить формулы (11) для использования с композицией произвольного, но четного количества равновесных кодов:

$$\begin{cases} z^0(X) = s_{r_1}(X) \vee s_{r_2}(X) \vee \dots \vee s_{r_k}(X) = \\ = \tau_{r_1} \overline{\tau_{r_1+1}} \vee \tau_{r_2} \overline{\tau_{r_2+1}} \vee \dots \vee \tau_{r_k} \overline{\tau_{r_k+1}}, \\ z^1(X) = s_{n-r_1}(X) \vee s_{n-r_2}(X) \vee \dots \vee s_{n-r_k}(X) = \\ = \tau_{n-r_1} \overline{\tau_{n-r_1+1}} \vee \tau_{n-r_2} \overline{\tau_{n-r_2+1}} \vee \dots \vee \tau_{n-r_k} \overline{\tau_{n-r_k+1}}. \end{cases} \quad (12)$$

Утверждение 4. Тестер, реализуемый по системе формул (12) на логических элементах с произвольным числом входов, будет иметь четыре уровня.

Обоснование утверждения 4 непосредственно следует из утверждения 3 и системы (12), где реализуется выражение вида «дизъюнкция конъюнкций».

Аналогично формулам (4) и (8) можно получить выражения, характеризующие показатель сложности технической реализации структур тестеров произвольного четного числа равновесных кодов. Однако с ростом количества равновесных кодов в композиции существенно усложняются и сами формулы расчета. Например, для четырех кодов имеем следующую формулу с биномиальными коэффициентами:

$$\begin{aligned} L_{n, r_1, r_2} = (n+2) \sum_{i=0}^{i=2} C_n^{r+i} + \\ + (r+4) C_n^{r+3} + (n-r+2) C_n^{r-1} + 8. \end{aligned} \quad (13)$$

Преобразование формулы (13) к аналогичному (8) виду приводит к появлению сложных коэффициентов в виде дробей.

Отметим также, что для композиций с произвольным количеством равновесных кодов также можно применить разработанный авторами метод синтеза тестеров, но с учетом выражения (10). При этом свойства структуры тестеров могут поменяться в зависимости от того, кодовые слова каких равновесных кодов будут входить во множества Ω^1 и Ω^2 .

Заключение

Предложенный метод синтеза тестеров композиций равновесных кодов позволяет реализовать целое семейство их структур для использования при синтезе дискретных устройств. Однако особенностью тестеров оказывается то, что при использовании множества кодовых слов, принадлежащих композиции двух равновесных кодов, не удастся формировать тестовые комбинации для всех внутренних точек их схем. Поэтому тестеры, синтезируемые по предложенному методу, можно использовать в самопроверяемых реализациях либо притестово-функциональном диагностировании при периодическом прогоне кодовых слов $\langle 00...00 \rangle$ и $\langle 11...11 \rangle$ для тестеров композиции $1/n$ и $(n-1)/n$ и кодового слова $\langle 00...00 \rangle$ для тестеров композиций r/n и $(n-r)/n$ при $r \geq 2$, не принадлежащих рассматриваемым композициям, с кратковременным отключением тестера от работы в специально отведенные временные интервалы, либо же при реализации на высоконадежной элементной базе с низкими показателями интенсивности отказов.

Тестеры композиций двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями, синтезированные по предложенному авторами методу, оказываются быстродействующими и содержат всего три уровня элементов. Установленные же в статье зависимости позволяют оценить показатели сложности их реализации для произвольных значений n и r и выбрать требуемый тестер в каждом конкретном случае синтеза

дискретного устройства. Например, для устройства с большим количеством выходов могут использоваться схемы встроенного контроля по двум и более группам выходов, синтезированные с использованием композиций равновесных кодов с меньшими значениями числа разрядов, являющиеся более простыми. Вопросы схемотехнического применения тестеров при синтезе самопроверяемых дискретных устройств выходят за рамки настоящей статьи и требуют отдельных исследований.

Поскольку подходы к синтезу тестеров композиций равновесных кодов остаются недостаточно исследованными, предложенный метод позволяет частично закрыть этот пробел и использовать его для построения схем детектирования кодовых слов. Дальнейшие исследования авторов могут быть сосредоточены на разработке теории синтеза тестеров композиций произвольного числа равновесных кодов. Здесь интересными могут оказаться реализации в виде полиномиального представления булевых функций с различной полярностью [24], вычисляемых на выходах тестеров, что может позволить сократить значения показателей сложности их технической реализации, а также обеспечить простоту в тестируемости в процессе эксплуатации. ▲

Список источников

- Сапожников В. В. Методы построения безопасных микросистем железнодвигательной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1995. — 272 с.
- Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. — John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
- Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук, Ю. В. Дрозд и др. — Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 614 с.
- Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 2. — С. 180–193.
- Saposhnikov V. V. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits / V. V. Saposhnikov, A. Morosov, V. V. Saposhnikov, M. Göessel // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1998. — Vol. 12. — Iss. 1–2. — Pp. 41–53. — DOI: 10.1023/A:1008257118423.
- Morosow A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosow, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, M. Goessel // VLSI Design. — 1998. — Vol. 5. — Iss. 4. — Pp. 333–345. — DOI: 10.1155/1998/20389.
- Efanov D. V. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2020. — Vol. 54. — Iss. 4. — Pp. 279 – 290. — DOI: 10.3103/S0146411620040045.
- Слабаков Е. В. Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием равновесных кодов / Е. В. Слабаков, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 9. — С. 173–181.
- Сапожников В. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов и др. // Электронное моделирование. — 2002. — Т. 24. — № 6. — С. 52–66.
- Гессель М. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
- Сапожников В. В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. — 112 с.
- Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
- Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб.: Энергоатомиздат (Санкт-Петербургское отделение), 2001. — 331 с.
- Сапожников В. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. — СПб.: Элмор, 2006. — 220 с.
- Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. — Dordrecht: Springer Science + Business Media B.V., 2008. — 184 p.
- Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с.
- Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
- Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
- Ефанов Д. В. Методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств. — М.: ЛЕНАНД, 2025. — 268 с.
- Ефанов Д. В. Композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями для синтеза самопроверяемых дискретных устройств /

- Д. В. Ефанов // Проблемы управления. — 2025. — № 3. — С. 49–62.
21. Сапожников В. В. Самопроверяемые тестеры для равновесных кодов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 3. — С. 3–35.
 22. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
 23. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
 24. Супрун В. П. Основы теории булевых функций. — М.: ЛЕНАНД, 2017. — 208 с.
 25. Деза Е. Фигурные числа / Е. Деза, М. Деза; пер. с англ. — М.: МЦНМО, 2015. — 350 с.
 26. Грэхем Р. Л. Конкретная математика. Математические основы информатики / Р. Л. Грэхем, Д. Э. Кнут, О. Паташник; пер. с англ.; 2-е изд. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. — 784 с.
 27. Ефанов Д. В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Труды Института системного программирования РАН. — 2019. — Т. 31. — № 1. — С. 115–132. — DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.
 28. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, G. Osadchy et al. // Proceedings of the 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. — Pp. 136–143. — DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 29. Ефанов Д. В. Метод функционального контроля комбинационных логических устройств на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов /
 - Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Электронное моделирование. — 2020. — Т. 42. — № 3. — С. 27–52. — DOI: 10.15407/emodel.42.03.027.
 30. Efanov D. V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters / D. V. Efanov, D. V. Pivovarov // Proceedings of the 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021. — Pp. 200–206. — DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
 31. Пospelов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем / Д. А. Пospelов. — М.: Энергия, 1968. — 328 с.
 32. Василенко М. Н. О сокращении списка одиночных неисправностей при построении тестов комбинационных схем / М. Н. Василенко, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 8. — С. 139–145.
 33. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. — 588 с.
 34. Тюрин С. Ф. Методы обеспечения надежности элементов ПЛИС путем многовариантного резервирования с использованием логико-топологической модификации на транзисторном уровне / С. Ф. Тюрин, М. С. Никитин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2025. — № 54. — С. 282–301. — DOI: 10.15593/2224-9397/2025.2.13.
 35. Тюрин С. Ф. Многовариантное резервирование с использованием логико-топологических особенностей транзисторных схем / С. Ф. Тюрин, М. С. Никитин, Ю. А. Степаченков, Ю. Г. Дьяченко // Информатика и ее применения. — 2025. — Т. 19. — № 3. — С. 55–66.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 355–368
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-355-368

Design Method of High-Speed Checkers for Two Constant-Weight Codes with Orthogonal Combinations Across All Bits Using the Symmetric Boolean Functions

Information about authors

Efanov D. V., Doctor of Engineering, Professor, IEEE Member, Full Member of International Transport Academy, Professor^{1,2,3,4}, Leading Researcher⁵. E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Yelina Ye. I., Postgraduate Student². E-mail: eseniya-elina@mail.ru

Ncungo T. M., Postgraduate Student¹. E-mail: tomasmavungu2018@gmail.com

Leskovets I. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department⁶. E-mail: le@bru.by

Gebel E. S., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: gebel_es@spbstu.ru

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Higher School of Cyberphysical Systems & Control, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Saint Petersburg

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Higher School of Transport, Mechanical Engineering, Material and Transport Institute, Saint Petersburg

³Russian University of Transport (MIIT), Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport, Moscow

⁴Tashkent State Transport University, Department of Automation and Remote Control, Tashkent

⁵Institute of Transport Problems named after N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Problems of Organization of Transport Systems (Laboratory No. 5), Saint Petersburg

⁶Belarusian-Russian University, Department of Transport and Technological Machines, Mogilev

Abstract: This paper aims to enhance the design method for self-checking discrete devices used in automatic control systems, based on the composition of two constant-weight codes with orthogonal combinations across all bits. A method has been proposed for design high-speed checkers for the composition of constant-weight codes with orthogonal combinations across all bits. This approach entails the construction of checkers based on detectors of the two constant-weight codes, utilizing the properties of symmetric Boolean functions. Dependencies have been established that enable the determination of the complexity indicator for the technical implementation of the checker, applicable to any length of code words. Some properties and characteristics of the synthesized testers are presented. The technique for synthesizing testers for a composition of an arbitrary number of constant-weight codes is demonstrated. The findings of this research can be applied in the development of highly reliable and safe discrete devices using various element bases.

Keywords: self-checking discrete device; composition of two constant-weight codes; symmetric Boolean function; design of the composition of constant-weight codes; checker efficiency index.

References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. *Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Methods for constructing safe microelectronic systems of railway automation]; ed. by V. I. Sapozhnikov. Moscow: Transport Publ., 1995. 272 p. (In Russian)

2. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
3. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V. et al. Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Operational diagnostics of safe information and control systems]; ed. by A. V. Drozd and V. S. Kharchenko. Kharkiv: Natsional'nyy aerokosmicheskyy universitet im. N. E. Zhukovskogo "KhAI" Publ., 2012. 614 p. (In Russian)
4. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Issledovanie kombiniatsionnykh samoproveryaemykh ustroystv s nezavisimymi i monotonno nezavisimymi vykhodami [Research of combinational self-checking devices with independent and monotonically independent outputs]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1997, Iss. 2, pp. 180–193. (In Russian)
5. Sapozhnikov V. V., Morosov A., Sapozhnikov V. V., Gössel M. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, vol. 12, Iss. 1–2, pp. 41–53. DOI: 10.1023/A:1008257118423.
6. Morosov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Gössel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. *VLSI Design*, 1998, vol. 5, Iss. 4, pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
7. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, vol. 54, Iss. 4, pp. 279–290. DOI: 10.3103/S0146411620040045.
8. Slabakov E. V., Sogomonyan E. S. Postroenie polnost'yu samoproveryaemykh kombiniatsionnykh ustroystv s ispol'zovaniem ravnoesnykh kodov [Construction of fully self-checking combinational devices using balanced codes]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1980, Iss. 9, pp. 173–181. (In Russian)
9. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Dmitriev A. V., Morozov A. V. et al. Organizatsiya funktsional'nogo kontrolya kombiniatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Organization of functional control of combinational circuits by the method of logical complement]. *Elektronnoe Modelirovanie* [Electronic Modeling]. 2002, vol. 24, Iss. 6, pp. 52–66. (In Russian)
10. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Logicheskoe dopolnenie — novyy metod kontrolya kombiniatsionnykh skhem [Logical complement — a new method for checking combinational circuits]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003, Iss. 1, pp. 167–176. (In Russian)
11. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Diskretnye avtomaty s obnaruzheniem otkazov* [Discrete automata with fault detection]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1984, 112 p. (In Russian)
12. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1989. 208 p. (In Russian)
13. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Gessel' M. *Samodvoystvennye diskretnye ustroystva* [Self-dual discrete devices]. Saint Petersburg: Energoatomizdat Publ., 2001, 331 p. (In Russian)
14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Valiev R. Sh. *Sintez samodvoystvennykh diskretnykh sistem* [Design of self-dual discrete systems]. Saint Petersburg: Elmor Publ., 2006, 220 p. (In Russian)
15. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008, 184 p.
16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv* [Hamming codes in functional control systems of logic devices]. Saint Petersburg: Nauka Publ., 2018, 151 p. (In Russian)
17. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 1: Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii* [Sum codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
18. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 2: Vzveshennyye kody s summirovaniem* [Sum codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted sum codes]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
19. Efanov D. V. *Metody sinteza samoproveryaemykh diskretnykh ustroystv* [Design methods of self-checking discrete devices]. Moscow: LENAND Publ., 2025, 268 p. (In Russian)
20. Efanov D. V. Kompozitsii dvukh ravnoesnykh kodov s ortogonal'nymi po vsem razryadam kombiniatsiyami dlya sinteza samoproveryaemykh diskretnykh ustroystv [Compositions of two balanced codes with orthogonal combinations in all bits for synthesis of self-checking discrete devices]. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2025, Iss. 3, pp. 49–62. (In Russian)
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Samoproveryaemye testery dlya ravnoesnykh kodov [Self-checking testers for balanced codes]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1992, Iss. 3, pp. 3–35. (In Russian)
22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Samoproveryaemye diskretnye ustroystva* [Self-checking discrete devices]. Saint Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
23. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
24. Suprun V. P. *Osnovy teorii bulevykh funktsiy* [Fundamentals of Boolean function theory]. Moscow: LENAND Publ., 2017, 208 p. (In Russian)
25. Deza E., Deza M. *Figurnye chisla* [Figurate numbers]; transl. from English. Moscow: MTsNMO Publ., 2015, 350 p. (In Russian)
26. Grekhem R. L., Knut D. E., Patashnik O. *Konkretnaya matematika. Matematicheskie osnovy informatiki* [Concrete mathematics. Mathematical foundations of computer science]; transl. from English; 2nd ed. Moscow: I.D. Vil'yams Publ., 2017, 784 p. (In Russian)
27. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Pivovarov D. V. Obnaruzhenie neispravnostey v kombiniatsionnykh skhemakh na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnoesnykh kodov [Detection of faults in combinational circuits based on self-dual complement to balanced codes]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS]. 2019, vol. 31, Iss. 1, pp. 115–132. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8. (In Russian)
28. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V., Osadchy G. et al. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. *Proceedings of the 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
29. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Pivovarov D. V. Metod funktsional'nogo kontrolya kombiniatsionnykh logicheskikh ustroystv na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnoesnykh kodov [Method of functional control of combinational logic devices based on self-dual complement to balanced codes]. *Elektronnoe modelirovanie* [Electronic Modeling]. 2020, vol. 42, Iss. 3, pp. 27–52. DOI: 10.15407/emodel.42.03.027. (In Russian)
30. Efanov D. V., Pivovarov D. V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters. *Proceedings of the 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
31. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem* [Logical methods of circuit analysis and synthesis]. Moscow: Energiya Publ., 1968, 328 p. (In Russian)
32. Vasilenko M. N., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. O sokrashchenii spiska odinochnykh neispravnostey pri postroenii testov kombiniatsionnykh skhem [On reducing the list of single faults when constructing tests for combinational circuits]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1974, Iss. 8, pp. 139–145. (In Russian)
33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki* [Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2019, 588 p. (In Russian)
34. Tyurin S. F., Nikitin M. S. Metody obespecheniya nadezhnosti elementov PLIS putem mnogovariantnogo rezervirovaniya s ispol'zovaniem logiko-topologicheskoy modifikatsii na tranzistornom urovne [Methods for ensuring the reliability of FPGA elements through multi-variant redundancy using logic-topological modification at the transistor level]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems]. 2025, Iss. 54, pp. 282–301. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.2.13. (In Russian)
35. Tyurin S. F., Nikitin M. S., Stepchenkov Yu. A., D'yachenko Yu. G. Mnogovariantnoe rezervirovanie s ispol'zovaniem logiko-topologicheskikh osobennostey tranzistornykh skhem [Multi-variant redundancy using logic-topological features of transistor circuits]. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and Its Applications]. 2025, vol. 19, Iss. 3, pp. 55–66. (In Russian)