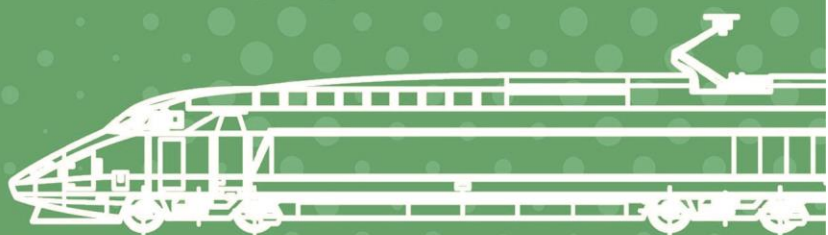


ISSN 2415-8658

**ТРАНСПОРТ
АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО
РЕГИОНА**

**PACIFIC RIM COUNTRIES
TRANSPORTATION SYSTEM**



№ 3(44) 2025

Научный журнал
Издается с марта 2013 г.
Периодичность: 4 номера в год
ISSN 2415-8658
Подписной индекс
в общероссийском каталоге
ООО «Урал-Пресс Округ» – 25213

Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона

№ 3(44) 2025

Главный редактор

Давыдов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта

Заместители главного редактора

Нератова Оксана Анатольевна, кандидат технических наук
Малышева Ольга Александровна, кандидат технических наук

Редакционная коллегия

Буровцев Владимир Викторович, доктор экономических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск
Анисимов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ПГУПС, г. Санкт-Петербург
Годяев Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Жданова Светлана Мирзахановна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск
Квашук Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кравчук Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, ТОГУ, г. Хабаровск
Кудрявцев Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, ДВГУПС, г. Хабаровск
Кулинич Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск
Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск

Нестерова Наталья Станиславовна, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск

Парамонов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, член российского и международного общества по геотехнике и фундаментостроению (РОМГГиФ и ISSMGE), ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Пиотрович Алексей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ДВГУПС, г. Хабаровск

Пугачев Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, ДВГУПС, г. Хабаровск

Стоянович Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, почетный работник науки и техники РФ, ДВГУПС, г. Хабаровск

Железнов Дмитрий Валерианович, доктор технических наук, профессор, ПАО «Трансконтейнер», г. Москва

Рахимов Рустам Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ТГТУ, Узбекистан

Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре

Федюк Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ДВФУ, г. Владивосток

Числов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ма Юньдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Чэнь Бинчжи, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Ли Вэйдун, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Цзян Алань, профессор, Даляньский транспортный университет, г. Далянь, КНР

Чжин Чжанвон, профессор, Корейский национальный университет транспорта, г. Ыйван, Республика Корея

В соответствии с распоряжением ВАК РФ от 22.11.2022 г. № 1482-р научный журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки).

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки).

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки).

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки).

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки).

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки).

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки).

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки).

2.9.9. Логистические транспортные системы (технические науки).

Сотрудники редакции

редактор, переводчик – Заикина Светлана Сергеевна
технический редактор – Ларионова Надежда Викторовна

Учредитель

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-51966 от 29 ноября 2012 г. выдано Роскомнадзором.

Отпечатано в издательстве ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Адрес редакции

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, каб. 359
Дальневосточный государственный университет
путей сообщения, тел./факс: (4212) 40-77-65
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Сайт: tratr.dvgups.ru

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При перепечатке ссылка на журнал «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» обязательна.

Журнал обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Подписано в печать 05.11.2025. Дата выхода в свет 10.11.2025.
Заказ 177. Усл. печ. л. 14,1. Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–40 экз.). Цена свободная.

Pacific Rim countries transportation system

№ 3(44) 2025

Scientific Journal

Issued since March 2013

Frequency: 4 issues a year

ISSN 2415-8658

Subscription index

LLC «Ural-Press Okrug» – 25213

Chief Editor

Davydov Yuriy Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of the Russian Transport Academy

Deputy Chief Editors

Neratova Oksana Anatol'evna, Ph.D., Associate Professor
Malysheva Olga Aleksandrovna, Ph.D., Associate Professor

Editorial Board

Burovtsev Vladimir Viktorovich, Doctor of Science (Economics), Professor, Academician of the Russian Transport Academy, FESTU, Khabarovsk

Anisimov Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, PGUPS, Saint Petersburg

Godyaev Aleksandr Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Zhdanova Svetlana Mirzakhanovna, Doctor of Science (Engineering), FESTU, Khabarovsk

Ignatenko Ivan Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor FESTU, Khabarovsk

Kvashuk Sergey Vladimirovich, Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Kravchuk Valeriy Andreevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FESTU, Khabarovsk

Kudryavtsev Sergey Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, FESTU, Khabarovsk

Kulinich Yuriy Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Li Valeriy Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Piotrovich Aleksey Anatol'evich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Pugachev Igor Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FESTU, Khabarovsk

Nesterova Natalya Stanislavovna, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, FESTU, Khabarovsk

Stoyanovich Gennadiy Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering), Associate professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, FESTU, Khabarovsk

Zheleznov Dmitrii Valerianovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, «Transcontainer» PJSC, Moscow

Rakhimov Rustam Vyacheslavovich, Doctor of Science (Engineering) Sciences, Professor, TSTU, Uzbekistan

Paramonov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Member of the Russian and International Society for Geotechnics and Foundation Engineering (RSSMGFE and ISSMGE), PGUPS, Saint Petersburg

Serikov Aleksandr Vladimirovich, Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, KNASTU, Komsomolsk-on-Amur

Fediuk Roman Sergeevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, FEPU, Vladivostok

Chislov Oleg Nikolaevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, RSTU, Rostov-on-Don

Ma Yundong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Chen Bingzhi, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Li Weidong, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Jiang Alan, Professor, Dalian Jiaotong University, Dalian, P.R. China

Jin Jangwon, Ph.D., Korea National University of Transportation, Uiwang, Republic of Korea

The Journal is licensed and indexed by the State Commission for Higher Degrees and titles (VAK RF order № 1482-r, 22.11.2022); it is included in the list of journals where the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree of Candidates of Sciences and Doctors of Sciences should be published (according to the following specialties):

2.1.1. Structures and buildings (Technical sciences).
2.1.2. Foundations and underground structures (Technical sciences).

2.1.7. Construction technology and organization (Technical sciences).

2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (Engineering sciences).

2.4.2. Electrical complexes and systems (Technical sciences).

2.4.5. Energy systems and complexes (Technical sciences).

2.9.1. Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport (Technical sciences).

2.9.2. Railway track, survey and design of railroads (Technical sciences).

2.9.3. Rolling stock of railroads, traction and electrification (Technical sciences).

2.9.4. Transportation process management (Technical sciences).

2.9.8. Intelligent transport systems (Technical sciences).

2.9.9. Logistic transport systems (Technical sciences).

Editorial Staff

Editor, Translator – Zaikina Svetlana Sergeevna
Technical Editor – Larionova Nadezhda Viktorovna

Founder

680021, Khabarovsk, Serysheva, 47
Far Eastern State Transport University

Mass media Registration Certificate PI,
Number FS77-51966, November 29, 2012,
issued by Roskomnadzor.

Printed at Far Eastern State Transport University
Publishing Center.

Editorial office address and contacts:

680021, Khabarovsk, Serysheva St., 47, room 359
Far Eastern State University, tel./fax: (4212) 40-77-65.
E-mail: apr-journal-ed@list.ru
Website: tratr.dvgups.ru

The editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors of articles. At reprinting the reference to the journal is obligatory.

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

Signed in print 05.11.2025. Publication date 10.11.2025.
Order 177. P. 14.1. Circulation 500 copies
(1st plant 1–40 copies). Free price.

СОДЕРЖАНИЕ

.....	
Голик А.Л., Каликина Т.Н. ВЛИЯНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЕЖУРНО-ДИСПЕТЧЕРСКИМ АППАРАТОМ НА НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В РАБОТЕ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД	5
Давыдов Ю.А., Давыдова Е.Н., Пахомова А.О. АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ СЛИВНЫХ ПРИБОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН.....	14
Кабалык Ю.С., Букреев С.В. ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	19
Канарский В.А., Кулалев Е.С. ЦИФРОВЫЕ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ: ЕВРОПЕЙСКИЙ ОПЫТ И РЕАЛИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ	27
Волчек Т.В., Томилов В.С., Волчек Р.В. МОНИТОРИНГ ИСКРЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	35
Кузьмин О.С., Луценко А.Н., Король Р.Г., Куликова Е.С. РЕШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОТКАЗОВ СЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ЗА СЧЕТ МИНИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОШИБОК	41
Лосев Д.С., Гуляев А.В. ПОРТАТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	47
Сидорович М.А. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯМ.....	54
Воприков А.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО РАБОТЫ.....	61
Воприков А.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ	67
Гателюк О.В., Незевак В.Л., Павлова Р.В. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ	73
Жигальцова А.С., Кудрявцев С.А., Цвигунов Д.Г., Шестаков И.В. УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЯ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА ПУТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ	81
Исса Хайдер Абдулсахиб Исса, Велькин В.И., Абдали Лаит Мохаммед Абдали3, Кувшинов В.В., Муровский С.П., Щекленн С.Е. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ТРЕКЕРАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ PID И FOPID-РЕГУЛЯТОРОВ	87
Смирных И.А., Жигунов М.А., Гуляев А.В., Тен Е.Е. РАЗРАБОТКА НОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА СБОРКИ РЕЛЬСОШПАЛЬНЫХ РЕШЕТОК	96
Маринин С.А. АНАЛИЗ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРИГОРОДНОМ ДВИЖЕНИИ	102
Чикир М.В. ДВУХЭТАПНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВАРИИ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА. ЧАСТЬ I. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ	108
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	120

CONTENTS

.....	
Golik A.L., Kalikina T.N. THE INFLUENCE OF THE EXISTING DECISION-MAKING MECHANISM BY THE DISPATCHER ON UNPRODUCTIVE LOSSES IN THE WORK OF LOCOMOTIVE CREWS	5
Davidov Y.A., Davidova E.N., Pakhomova A.O. ANALYSIS OF THE CAUSES OF DEPRESSURIZATION OF DRAIN DEVICES IN RAILWAY TANK CARS	14
Kabalyk I.S., Bukreev S.V. APPLICATION OF CLOUD COMPUTING FOR SIMULATION OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVE.....	19
Kanarsky V.A., Kulalev E.S. DIGITAL INTERLOCKING: EUROPEAN EXPERIENCE AND REALITIES OF DOMESTIC RAILWAY AUTOMATICS	27
Volchek T.V., Tomilov V.S., Volchek R.V. MONITORING OF sparking of THE COLLECTOR-BRUSH APPARATUS OF ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTORS IN OPERATION.....	35
Kuzmin O.S., Lutsenko A.N., Korol R.G., Kulikova E.S. SOLVING THE TECHNICAL PROBLEM OF PREVENTING FAILURES OF THE DISCHARGE SYSTEM OF RAILWAY TANK CARS BY MINIMIZING OPERATIONAL ERRORS	41
Losev D.S., Gulyaev A.V. PORTABLE DEVICE FOR RAPID ASSESSMENT OF TEMPERATURE SENSORS PERFORMANCE	47
Sidorovich M.A. DIAGNOSTICS SYSTEM FOR CATENARY LINE INSULATORS BASED ON RADIO EMISSIONS	54
Voprikov A.V. IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A CENTRAL HEATING STATION OPERATION BASED ON A MATHEMATICAL OPTIMIZATION MODEL	61
Voprikov A.V. IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL CENTRAL HEATING STATION THROUGH AUTOMATION AND TECHNICAL MODERNIZATION	67
Gatelyuk O.V., Nezevak V.L., Pavlova R.V. STATISTICAL CHARACTERISTICS OF POWER OF THE HIGHER HARMONIC COMPONENTS IN THE SYSTEM OF auxiliary power requirements OF TRACTION SUBSTATIONS.....	73
Zhigaltsova A.S., Kudryavtsev S.A., Tsvigunov D.G., Shestakov IV. INCREASING THE RELIABILITY OF THE FOUNDATION OF THE RECONSTRUCTED SECTION OF THE FAR EASTERN RAILWAY.....	81
Issa Hayder A., Velkin Vladimir I., Abdali Layth M., Kuvshinov V.V., Murovsky S.P., Shcheklein S.E. CONTROL EFFICIENCY OF DUAL-AXIS SOLAR TRACKERS USING PID AND FOPID REGULATORS.....	87
Smirnykh I.A., Zhigunov M.A., Gulyaev A.V., Ten E.E. MODERNIZATION OF A ROBOTIC COMPLEX FOR ASSEMBLING RAIL-TIE GRIDS.....	96
Marinin S.A. ANALYSIS OF ELECTRICITY RECOVERY IN COMMUTER TRAFFIC	102
Chikir M.V. TWO-STAGE MODELING OF A RAILWAY ACCIDENT OF THE NATURAL CHARACTER. PART I. EXPLORATORY DATA ANALYSIS	108
AUTHORS GUIDELINES.....	121

Научная статья
УДК 629.4.27.4:625.1.31.1
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-5-13

ВЛИЯНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЕЖУРНО-ДИСПЕТЧЕРСКИМ АППАРАТОМ НА НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В РАБОТЕ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

Голик Антон Леонидович¹, Каликина Татьяна Николаевна²

^{1,2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ antony1279@mail.ru

² kalikina@mail.ru

Аннотация. Изучено влияние отказов технических средств 1-й и 2-й категории в границах Дальневосточной железной дороги (ДВОСТЖД) в период с 2021 по 2024 гг. на качество работы локомотивного комплекса. В рамках рассмотрения причин непроизводительных потерь в работе локомотивных бригад особое внимание уделено причинам, связанным с решениями дежурно-диспетчерского аппарата, принимаемыми в условиях нарушений графика движения поездов (ГДП), вызванным в том числе возникающими отказами технических средств. Проведенный анализ действующей нормативно-технической документации и выводы, сформулированные в ходе анкетирования дежурно-диспетчерского аппарата, свидетельствуют о том, что существующий механизм принятия решения выбора оптимального пропуска поездов при нарушениях ГДП имеет недостатки (не определены цель, задачи, критерии, ограничения), которые в конечном итоге выражаются не только в принятии неоптимальных решений, но и невозможности объективной оценки со стороны владельца процесса с последующей разработкой корректирующих мер. На основании проведенной работы определено дальнейшее направление исследования.

Ключевые слова: отказ технических средств 1-й и 2-й категории, непроизводительные потери в работе локомотивных бригад, график движения поездов, дежурно-диспетчерский аппарат, система принятия решения, простая (сложная) информация

Original article

THE INFLUENCE OF THE EXISTING DECISION-MAKING MECHANISM BY THE DISPATCHER ON UNPRODUCTIVE LOSSES IN THE WORK OF LOCOMOTIVE CREWS

Golik Anton L.¹, Kalikina Tatiana N.²

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ antony1279@mail.ru

² kalikina@mail.ru

Abstract. The article examines the impact of malfunctions of technical means of category 1 and 2 within the boundaries of the Far Eastern Railway in the period from 2021 to 2024 on the quality of operation of the locomotive complex. As part of examining the causes of unproductive losses in the work of locomotive crews, special attention was paid to the reasons related to the decisions of on-duty and dispatchers personnel made in conditions of violations of the train schedule caused, among other things, by technical malfunctions. The analysis of the current regulatory and technical documentation and the conclusions made during a questionnaire poll among dispatchers indicate that the existing decision-making mechanism for choosing the optimal train passage in case of violations of the train schedule has disadvantages (the purpose, objectives, criteria, restrictions are not defined), which ultimately are expressed not only in making non-optimal decisions but also in the impossibility of giving an objective assessment by the owner of the process with the subsequent development of corrective measures. Based on the work carried out, the further direction of the study has been determined.

Keywords: malfunction of technical equipment of category 1 and 2, unproductive losses in the work of locomotive crews, train timetable, on-duty and dispatchers personnel, decision-making system, simple (complex) information

Проблема пропускных способностей на железнодорожной магистрали никогда не исчезала со времен ее основания, однако, в IV квартале 2024 г. проявилась с новой силой в связи с дефицитом пропускных способностей в первую очередь в направлении Восточного полигона сети ОАО «РЖД». С одной стороны, данная ситуация не является необычным

явлением, так как периодические «заторы» происходят то на одном, то на другом участке сети. Одновременно с этим необходимо отметить, что причины, озвучиваемые в настоящее время перевозчиком в лице ОАО «РЖД», в течение последних 10 лет не имели критического влияния на эксплуатационную работу железнодорожной отрасли, поэтому можно

утверждать, что они являются новым вызовом для всех участников перевозочного процесса. Так, именно профицитный парк грузовых вагонов на сети ОАО «РЖД», достигший на 1 января 2025 г. рекордных 1,382 млн единиц и более чем на 400 тыс. вагонов превышающий требуемое для «комфортной» работы сети образование подвижного состава, по мнению перевозчика в лице ОАО «РЖД» [1], является одной из причин, влияющих на снижение эксплуатационных показателей, характеризующих владельца инфраструктуры и перевозчика в одном лице как конкурентно-способного игрока на рынке транспортных услуг в сравнении с представителями других видов транспорта, в первую очередь таких, как автомобильный и морской: участковой и маршрутной скоростей грузовых поездов, оборота вагона, производительности локомотивов, надежности срока доставки и, как следствие, погрузки грузов.

Меры, принимаемые со стороны ОАО «РЖД» начиная с IV квартала 2024 г. по настоящее время, имеют в первую очередь направленность ограничительного характера: введение логических запретов на оформление порожнего подвижного состава, ввод ограничений на прием на инфраструктуру новых вагонов, работа с операторскими компаниями по исключению вагонов из перевозочного процесса (оформление в отстой), введение порядка очередности согласования приема грузов к перевозке, ввод в эксплуатацию «Динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД»» (ДМЗИ), снижение уровня немаршрутизированных перевозок и т.д.

Несомненно, все принимаемые меры должны обеспечить желаемый эффект от их внедрения и реализации, в то же время на текущий момент остро стоит вопрос об организации движения в существующих условиях теми работниками, кто выполняет свои обязанности и ежеминутно принимает решение в сложившейся непростой ситуации с избытком парка вагонов на сети, их нетехнологичного использования (встречные, угловые пробеги) и т.д. Одновременно с этим наблюдается тенденция усиления конкуренции на рынке транспортных услуг, а также повышение требований клиентов к их качеству. Именно поэтому для железнодорожных перевозок в условиях сильного влияния макроэкономических и политических факторов в течение последних 2–3 лет одним из стратегических направлений деятельности явился поиск решений для достижения более прочных позиций в качестве привлекательного для клиента гаранта бесперебойной и сохранной работы с доверенным для перевозки грузом. Непростая ситуация с «дефицитом» пропускных способностей Восточного полигона осложняется ситуацией с надежностью технических средств, имеющей в конечном счете негативное влияние не только на уже принятые к перевозке грузы, но и систематические отказы приема грузов к перевозке (конвенционные запрещения).

Так, в рамках исследования проанализирована

статистическая отчетность о работе технических средств (с использованием программы КАСКОР рассмотрены отказы 1-й и 2-й категорий) [2] в границах Дальневосточной железной дороги с 2021 по 2024 гг. и их влияние на график движения пассажирских, пригородных и грузовых поездов.

На рис. 1 представлен анализ возникновения отказов 1-й и 2-й категорий в абсолютном количестве выражении в границах ДВОСТЖД, в том числе отказы, приведшие к задержкам поездов на 1 ч и более. Наблюдается устойчивая тенденция роста не только общего количества отказов, но и отказов технических средств, приведших к задержке поездов на 1 ч и более. В то же время, несмотря на положительную динамику в части снижения средней продолжительности отказов в 2024 г. по отношению к предыдущим годам (рис. 2), а также снижения среднего количества поездов, задержанных при возникновении отказа (рис. 3), и среднего количества поездов, задержанных на один час и более (рис. 4), необходимо отметить увеличение средней продолжительности задержки одного поезда при возникновении отказа (рис. 5).

Таким образом, с учетом негативной динамики увеличения отказов технических средств в абсолютном значении за рассматриваемый период анализ качественных показателей отказов технических средств и задержек поездов указывает на то, что, с одной стороны, уменьшается продолжительность отказа технических средств и количество задержанных поездов при возникновении данного отказа, с другой стороны, увеличивается время задержки поезда. Кроме того, также рассчитана вероятность возникновения задержек поездов соответствующей категории при возникновении отказа технических средств (рис. 6), свидетельствующая о том, что уровень вероятности возникновения задержки грузового поезда составляет более 95 % на протяжении рассматриваемого периода, в то же время вероятность возникновения задержки пригородного и пассажирского поезда – на уровне 12 % и 5 % соответственно.

Задержка поезда любой категории в результате допущенного отказа технического средства несет за собой соответственно и корректировку графика движения поездов, что в конечном итоге имеет критическое влияние на организацию работы локомотивных бригад в целом.

Так, в рамках исследования проанализирована организация работы локомотивных бригад в границах ДВОСТЖД в период с 2021 по 2024 гг. На рис. 7 и 8 можно наблюдать, что, несмотря на замедление темпов объема работы и снижение в 2024 г. по отношению к уровню 2023 г., контингент локомотивных бригад ежегодно увеличивается. Анализ критериев, характеризующих качество использования локомотивных бригад, задействованных в перевозочном процессе, таких как случаи отправления локомотивных

ВЛИЯНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЕЖУРНО-ДИСПЕТЧЕРСКИМ АППАРАТОМ НА НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В РАБОТЕ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

бригад со временем более 2 ч от явки до отправления и непрерывное время работы локомотивных бригад более 12 ч, свидетельствует о том, что первый критерий показывает не очень динамичное, но все же снижение в 2024 г. по отношению к уровню 2023 и 2022 гг. (рис. 9), а недопустимое непрерывное время работы локомотивных бригад более 12 ч не только существует, но и характеризуется ростом в 2024 г. более чем в 5 раз к уровню 2021 г., в 2 раза – к уровню 2022 г., в 1,7 раз выше уровня 2023 г. (рис. 10).

Более детальный анализ проблемы нерационального использования локомотивных бригад свидетельствует о том, что причинами от 12,77 до 9,2 % всех случаев отправления локомотивных бригад

более 2 ч являются неверные действия дежурно-диспетчерского аппарата в ходе регулировки движения (рис. 9), кроме того, причинами более 12 % от всего объема сверхурочной работы также являются решения, принимаемые дежурно-диспетчерским аппаратом. Таким образом, если основываться на выводах относительно причин непроизводительных потерь в работе локомотивных бригад, то необходимо отметить, что каждая десятая причина связана с решениями дежурно-диспетчерского аппарата при организации пропуска поездов при возникающих нарушениях нормативного графика движения, в том числе при возникновении отказов технических средств.

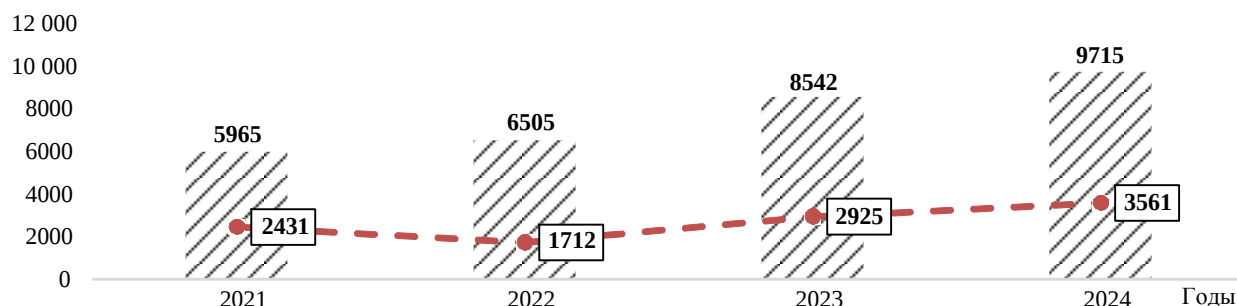


Рис. 1. Количество отказов, приведших к задержке поезда на 1 ч и более в рамках общего количества отказов в границах ДВОСТЖд, ед.: // - всего количество отказов на территории ДВОСТЖд; - всего отказов технических средств, приведших к задержке поезда на 1 ч и более

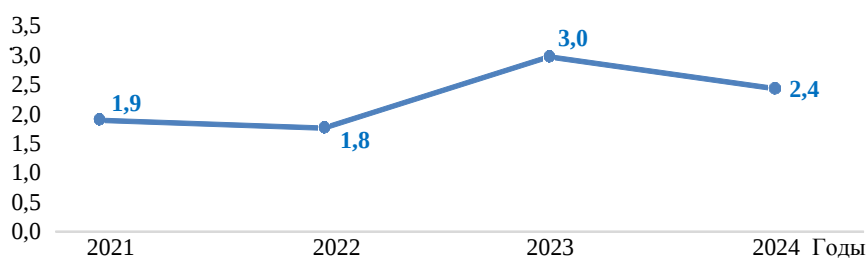


Рис. 2. Средняя продолжительность одного отказа, ч

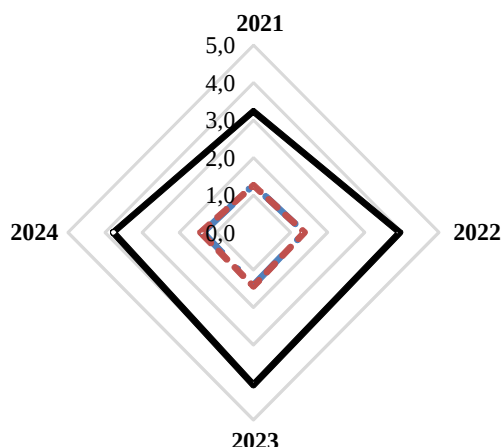


Рис. 3. Среднее количество задержанных поездов на один возникший отказ (1-й, 2-й категории): - пассажирских поездов; - пригородных поездов; - грузовых поездов

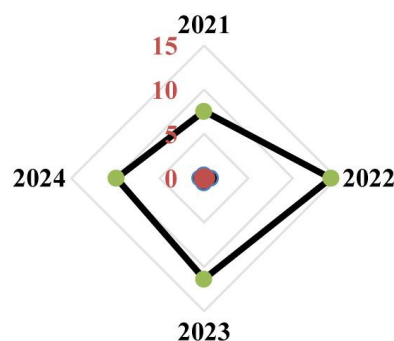
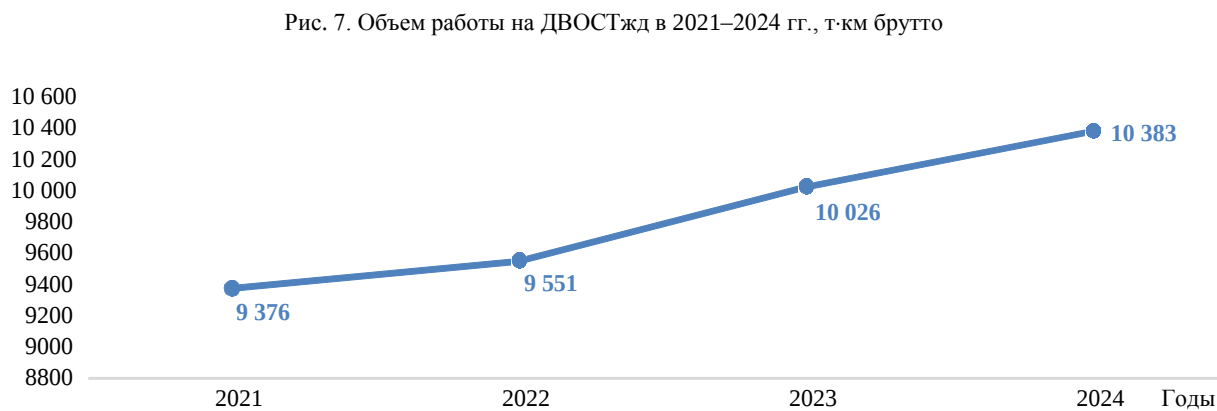
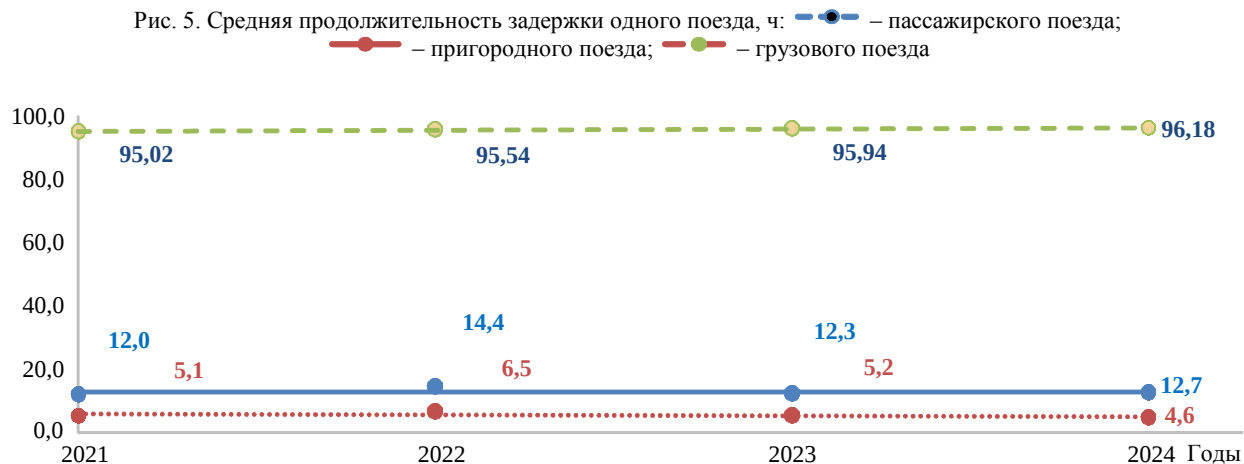
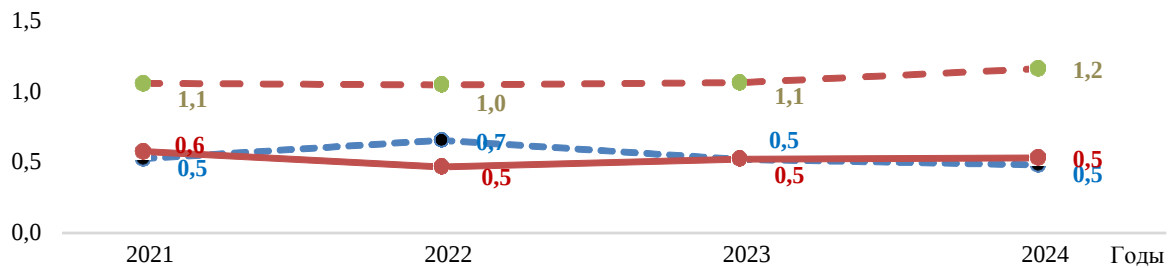


Рис. 4. Среднее количество задержанных поездов на один отказ (продолжительностью более 1 ч), ед.: - пассажирских поездов; - пригородных поездов; - грузовых поездов

THE INFLUENCE OF THE EXISTING DECISION-MAKING MECHANISM BY THE DISPATCHER
ON UNPRODUCTIVE LOSSES IN THE WORK OF LOCOMOTIVE CREWS



ВЛИЯНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЕЖУРНО-ДИСПЕТЧЕРСКИМ АППАРАТОМ НА НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В РАБОТЕ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

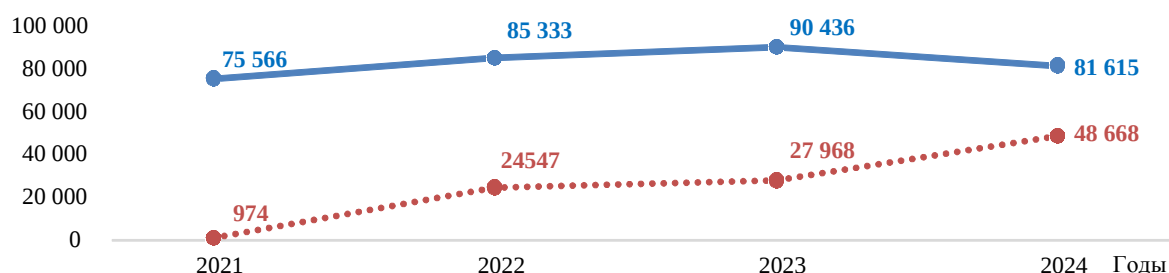


Рис. 9. Количество случаев непрерывной работы локомотивных бригад в 2021–2024 гг. более 12 ч и отправление бригад более 2 ч, ед.: — отправление локомотивных бригад свыше 2 ч; — количество случаев непрерывной работы

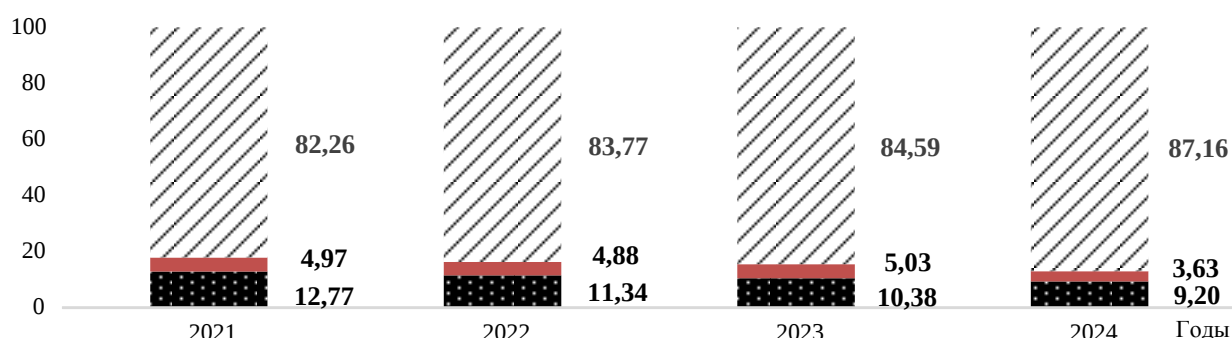


Рис. 10. Качественный анализ причин отправления локомотивных бригад со временем более 2 ч (от явки до отправления), %: ■ — регулировка ДНЦ; ■ — отказ технических средств (в том числе неисправность локомотива); ▨ — другие причины

Следовательно, решения дежурно-диспетчерского аппарата, определенные как причины непроизводительных потерь в работе локомотивных бригад, отнесены, по мнению специалистов, к нерациональным, т.е. неправильным. Таким образом, если с одной стороны происходит оценка правильности принятых решений дежурно-диспетчерского аппарата в части организации пропуска поездов, то в таком случае должна существовать научно обоснованная и принятая к исполнению система принятия решений на железнодорожном транспорте при выборе наиболее оптимального варианта пропуска поездов при возникновении нарушений нормативного графика движения поездов, в том числе должны быть сформулированы цели и задачи, описан желаемый результат от принятых решений, а также установлены критерии не только для принятия решений, но и для оценки правильности этих решений и т.д. [3]. В противном случае было бы справедливо сделать вывод о субъективности оценок, вынесенных действиям дежурно-диспетчерского аппарата. Вместе с тем основная проблема заключается в том, что, в отсутствие объективной оценки причин непроизводительных потерь, в первую очередь в работе локомотивных бригад на ответственности дежурно-диспетчерского аппарата, нет возможности правильно и своевременно принимать корректирующие действия, направленные на минимизацию рисков их возникновения.

В рамках изучения проблемы проведен анализ научных работ с конца XX в. по настоящее время, направленных на исследование и разработку систем поддержки принятия решений на железнодорожном транспорте, а также действующей нормативной документации, регламентов и программ обучения дежурно-диспетчерского аппарата, обеспечивающих функционирование системы принятия решений на железнодорожном транспорте, в том числе изучены методы увеличения пропускной способности перегонов и участков при нарушении нормативных и вариантных графиков движений поездов [4–6]. В итоге сделан вывод о том, что существующая модель принятия решений дежурно-диспетчерским аппаратом не изучена и не сформирована на данный момент в достаточной мере и, как следствие, с большой долей вероятности может не соответствовать поставленным целям и задачам определенного круга лиц перевозочного процесса.

Для проверки данной точки зрения проведено анкетирование с элементами интервью 180 поездных диспетчеров Восточного полигона (Восточно-Сибирской, Забайкальской, Дальневосточной железных дорог) по вопросу «Принятие решений и организация пропуска поездов при нарушениях их графика движения» [7], в ходе которого всем участникам было предложено три кейса вопросов, в каждом из которых следовало выразить позицию:

1) относительно информации, влияющей на решение по выбору варианта организации пропуска поездов при нарушении их графика движения (кейс 1);

2) условий, при которых требуется применение мер диспетчерского регулирования для организации пропуска поездов при нарушении их графика движения (кейс 2);

3) влияния важности решения задач при выборе варианта организации пропуска поездов при нарушении их графика движения (кейс 3).

Главный вывод на основе результатов проведенного анкетирования заключается в том, что в решениях и действиях дежурно-диспетчерского аппарата не прослеживается единый подход к пониманию поставленных целей, задач и, как следствие, способов их достижения при нарушении графика движения поездов. Несмотря на это, полученные результаты проведенного исследования не являются столь однозначными: ответы респондентов в рамках каждого из предложенных кейсов на некоторые вопросы были идентичными, что в свою очередь позволяет сделать предположение о существовании определенного общепринятого механизма в их действиях при принятии решений. На рис. 11 приведена диаграмма на основании ответов по кейсу 1.

Анализ полученных данных (рис. 11) показывает, что чем более понятна и измерима информация для конкретной ситуации, тем более сильное влияние она имеет на респондентов для последующего принятия решения. Поэтому в дальнейшем информацию предложено разделить на два вида: простую (измеримую, контролируруемую с помощью информационных систем и зависимую от действий дежурно-диспетчерского аппарата в реальном време-

ни) и сложную (не измеримую/сложно измеримую, не контролируемую с помощью информационных систем и независимую от действий дежурно-диспетчерского аппарата в реальном времени). На основании рейтинга степени влияния информации на принятие решения в условиях нарушений графика движения поездов [7], а также вида информации составлена таблица их зависимости.

Как видно из таблицы, наиболее влиятельной при принятии решения для дежурно-диспетчерского аппарата является простая информация, сложная не имеет значительного воздействия, кроме информации о загрузке соседнего участка, однако, в данном случае высока вероятность того, что напрямую она не влияет на первоочередные решения при пропуске поездов, так как находится вне границ зоны ответственности респондента, потому не является для него критической. Данный пример в ответах респондентов служит ярким подтверждением несовершенства принятого на практике механизма принятия решений, отражающего принцип «своя рубашка ближе к телу». При этом в случае игнорирования данной информации, последствия для достижения цели и выполнения поставленных задач, связанных с минимизацией времени восстановления графика движения поездов, могут быть непредсказуемыми.

Сравнение результатов анкетирования с анализом работы локомотивных бригад и отказами технических средств наглядно позволяет установить причинно-следственную связь цепочки этапов принятия решения «возникновение проблемы – обоснование принимаемого решения – действие (решение) – последствия».



Рис. 11. Влияние информации на принятие решения дежурно-диспетчерским аппаратом

Таблица

Зависимость между видом информации и степенью влияния на принятие решения в условиях нарушений графика движения поездов

Информация	Измеритель	Рейтинг влияния	Тип фактора	
			Простая	Сложная
1. Непрерывное время работы локомотивных бригад	Время, ч	1	+	
2. Необходимость графического пропуска внеочередных категорий поездов через место «сбоя»	Отклонение от нормативного времени хода, ч	1	+	
3. Необходимость графического пропуска внеочередных категорий поездов, нарушение графика движения поездов (пассажирские, пригородные, специальные поезда)	Отклонение от нормативного графика движения, ч	2	+	
4. Место, где произошло нарушение графика движения поездов (перегон, станция)	Перегон, станция, км, пк	3	+	
5. Продолжительность времени задержки в графике движения поездов	Время, ч	3	+	
6. Загрузка поездного участка	Количество поездов на участке по отношению к нормативному графику, ед.	3	+	
7. Продолжительность времени (от момента происхождения сбоя до получения информации о времени устранения сбоя)	Время, ч	4	+	
8. Минимизация времени простоя поездов на станциях под обгоном и скрещением в период проследования через место сбоя	Простой, ч	4		+
9. Исключение задержек (бросания) поездов с вагонами, имеющими грузы с рисками сроков доставок либо с истекшими сроками доставок	Поезд, ед.	5		+
10. Загрузка соседних поездных участков	Количество поездов на участке по отношению к нормативному графику, ед.	6	+	
11. Минимизация энергетических затрат, связанных с разгоном и торможением поездов	Расход электрической энергии, кВт·ч	7		+
12. Выполнение задания по соблюдению участковой скорости	Скорость, км/ч	7		+

Так, в таблице определен рейтинг влияния информации «непрерывное время работы локомотивных бригад» и «график движения пассажирских/пригородных поездов» как очень высокий (1-е и 2-е места соответственно), поэтому, несмотря на негативную динамику увеличения количества отказов технических средств с 2021 по 2024 г., приведших к задержке поездов на 1 ч и более (см. рис. 1), необходимо отметить, что количество задержанных поездов на один отказ и среднее время задержки одного поезда всех категорий сохраняется на одном уровне (см. рис. 3–5), при этом основное внимание уделяется именно пропуску пассажирских и пригородных поездов (см. рис. 6). Кроме того, наглядным подтверждением наиболее сильного влияния информации «непрерывное время работы локомотивных бригад» является принятие решений дежурно-диспетчерским аппаратом, направленных на минимизацию нарушений, связанных с данным критерием. Так, несмотря на благоприятную ситуацию с отказами технических средств (1-й и 2-й категории), необходимо отметить, что работа локомотивных бригад более 2 ч от явки до отправления имеет положительную динамику (снижается) с 2021 по 2024 гг., что подтверждают результаты, полученные в ходе анкетирования о сильном влиянии кри-

терия «непрерывное время локомотивных бригад» на принимаемое решение (см. рис. 9). При этом необходимо понимать, что случай отправления локомотивной бригады более 2 ч от явки до отправления управляем, и напрямую зависит от решения, выраженного в отмене запланированной нитки отправления поезда со станции. Конечно, в каждом конкретном случае необходимо оценивать ситуацию и не допускать более тяжелых последствий для организации движения из-за отмены отправления поезда с превышением нормативного времени локомотивной бригады от явки до отправления, но все же данная работа управляема.

С другой стороны, негативная динамика допуска случаев превышения непрерывного времени локомотивных бригад в пути следования, имеющая наибольшие риски в первую очередь для безопасности движения, свидетельствует либо о несовершенстве мер, принимаемых со стороны дежурно-диспетчерского аппарата, по различным причинам (отсутствие достаточного уровня теоретической или практической подготовки, компетенций и т.д.), т.е. функционирования всей существующей системы принятия решений управления перевозочным процессом, либо указывает на несовершенство технических и технологических решений со стороны владельцев процесса [8], созда-

ющих условия, в которых находится дежурно-диспетчерский аппарат, и при этом не учитывающих современные вызовы в оперативной работе, когда границы существующих ограничений сложно достижимы либо совсем могут быть не достигнуты при определенных обстоятельствах.

Проведенный анализ научных трудов, направленных на решение проблемы организации движения поездов через участки, имеющие инфраструктурные и другие ограничения, с целью выбора оптимального варианта показывает, что применяемые методы могут быть использованы в первую очередь, при разработке вариантных графиков движения в условиях проведения ремонтно-строительных работ, длительно не устраняемых неисправностей на инфраструктуре ОАО «РЖД», требующих закрытия одного или нескольких железнодорожных путей перегонов или станций либо и т.д. [7]. Кроме того, сами предлагаемые методы и расчеты для поисков наиболее оптимального варианта пропуска поездов, по мнению

авторов, сложны для применения на рабочем месте дежурно-диспетчерского аппарата из-за трудоемкости и сложности расчетов в условиях ограничений резерва времени для принятия решений.

Для поиска ответов на эти и другие вопросы в данной статье по итогам проведенного исследования созданы предпосылки для продолжения работы, направленной на формирование научно обоснованной актуальной модели системы поддержки принятия решений.

Концептуально новым в отношении методов решения проблемы является быстрый и понятный для дежурно-диспетчерского аппарата поиск и выбор необходимых критериев и ограничений при нарушении графика движения поездов, позволяющих правильно оценить возможные последствия для дальнейшего движения, а также предлагаемый алгоритм действий для минимизации его восстановления в соответствии с нормативными значениями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бородин А.Ф. Ёмкость железных дорог и размещение вагонных парков // Гудок. 2025. Вып. № 56 (28071). URL : <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1703596&archive=2025.04.17> (дата обращения: 14.05.2025).
2. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ. URL : <https://docs.cntd.ru/document/564210661> (дата обращения: 14.05.2025).
4. Петровский А.Б. Теория принятия решений : учебник для студентов высших учебных заведений. Москва : Академия, 2009. 400 с. (Прикладная математика и информатика).
5. Голик А.Л., Каликина Т.Н. Проблемы принятия решений поездным диспетчером при организации пропуска поездов после перерывов в движении // Транспорт Азиатско-тихоокеанского региона. 2020. № 3(24). С. 41–44.
6. Complex delay dynamics on railway networks from universal laws to realistic modelling / B. Monechi, P. Gravin, Riccardo Di Clemente, Vito D.P. Servedio // EPJ Data Science. 2018. (WoS, White list).
7. Lukinskiy V.S., Panova Y., Soletskiy R. Simulation modelling of supply chain with allowance of reliability // Russian Journal of Logistics and Transport Management. 2016. № 3(2). Pp. 49–60 (WoS, White list).
8. Голик А.Л., Каликина Т.Н. Формирование модели принятия решений как основы интеллектуальной системы управления движением поездов // АмурКон-2021 : международная научная конференция. Т. 126. Европейские труды по социальным и поведенческим наукам. Европейское издательство. 2022. С. 331–340.
9. Голик А.Л., Каликина Т.Н. Определение принципов формирования алгоритма задания желаемого результата в рамках принятия решения ЛПР при нарушениях ГДП // Транспорт Азиатско-тихоокеанского региона. 2020. № 3(24). С. 41–44.

REFERENCES

1. Borodin A.F. Yomkost' zheleznyh dorog i razmeshchenie vagonnyh parkov [Capacity of railways and placement of car fleets] // Gudok 2025. Vyp. № 56(28071). URL : <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1703596&archive=2025.04.17> (data obrashcheniya: 14.05.2025).
2. Polozheniye ob uchete, rassledovanii i analize otkazov v rabote tehnikeskikh sredstv na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoy sistemy KASANT [Regulations on Accounting, Investigation and Analysis of failures in the operation of technical equipment on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated KASANT system]. URL : <https://docs.cntd.ru/document/564210661> (data obrashcheniya: 14.05.2025).
3. Polozheniye ob uchete, rassledovanii i analize tehnologicheskikh narushenij v perevozhnom protsesse na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoy sistemy KASANT [Regulations on Accounting, Investigation and Analysis of Technological Violations in the Transportation Process on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated KASANT system]. URL : <https://docs.cntd.ru/document/564210661> (data obrashcheniya: 14.05.2025).
4. Petrovsky A.B. Teoriya prinyatiya reshenij [The theory of decision making] : uchebnik dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij. Moskva : Akademiya. 2009. 400 s. (Prikladnaya matematika i informatika).
5. Golik A.L., Kalikina T.N. Problemy prinyatiya reshenij poezdnyim dispetcherom pri organizatsii propuska poezdov posle pereryvov v dvizhenii [Problems of decision-making by a train dispatcher when organizing train passes after traffic breaks] // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. 2020. № 3(24). S. 41–44.
6. Complex delay dynamics on railway networks from universal laws to realistic modeling / B. Monechi, P. Gravin, Riccardo Di Clemente, Vito D. P. Servedio // EPJ Data Science, 2018. (WoS, White list).

7. Lukinskiy V.S., Panova Y. Soletskiy R. Simulation modelling of supply chain with allowance of reliability // Russian Journal of Logistics and Transport Management. 2016. № 3(2). Pp. 49–60 (WoS, Scopus).

8. Golik A.L., Kalikina T.N. Formirovanie modeli prinyatiya reshenij kak osnovy intellektual'noj sistemy upravleniya dvizheniem poezdov [Decision-making model's formation as the intelligent train traffic control system's basis] // AmurCon-2021 : mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. T. 126. Evropejskie trudy po sotsial'nyim i povedencheskim naukam. Evropejskoe izdatel'stvo. 2022. S. 331–340.

9. Golik A.L., Kalikina T.N. Opredelenie printsipov formirovaniya algoritma zadaniya zhelayemogo rezul'tata v ramkah prinyatiya resheniya LPR pri narusheniyah GDP [Definition of the principles of forming an algorithm for setting the desired result in the framework of decision-making in cases of GDP violations] // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. 2020. № 3(24). S. 41–44.

Информация об авторах

А.Л. Голик – доцент кафедры «Управление процессами перевозок»;

Т.Н. Каликина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление процессами перевозок».

Information about the authors

A.L. Golik – Associate Professor, Department of Transportation Processes Management;

T.N. Kalikina – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Organization of Transportation and Safety in Transport.

Статья поступила в редакцию 07.05.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.

The article was submitted: 07.05.2025; approved after reviewing: 23.06.2025; accepted for publication: 23.06.2025.

Научная статья
УДК 629.4.025
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-14-18

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ СЛИВНЫХ ПРИБОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН

Давыдов Юрий Анатольевич¹, Давыдова Елена Николаевна², Пахомова Анастасия Олеговна³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ puch0621@mail.ru

² davidova0621@mail.ru

³ anastasiabelkova251@gmail.com

Аннотация. Построена модель универсального сливного прибора железнодорожной цистерны для перевозки нефтепродуктов в программно-инженерном комплексе SolidWorks. Произведены расчеты напряженно-деформированного состояния универсального сливного прибора под действием статических нагрузок. Найдены причины нарушения герметичности основного клапана. Установлена оптимальная сила прижатия клапана к седлу. Приведен сравнительный анализ данных, полученных с помощью моделирования и реальных эксплуатационных данных.

Ключевые слова: вагон-цистерна, универсальный сливной прибор, основной клапан, модель

Original article

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DEPRESSURIZATION OF DRAIN DEVICES IN RAILWAY TANK CARS

Davidov Yuri A.¹, Davidova Elena N.², Pakhomova Anastasia O.³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ puch0621@mail.ru

² davidova0621@mail.ru

³ anastasiabelkova251@gmail.com

Abstract. A model of a universal drain device for a railway tank car for transporting petroleum products has been constructed in the SolidWorks software engineering complex. Calculations of the stress-strain state of the universal drain device under static loads have been made. The causes of the violation of the tightness of the main valve have been identified. The optimal clamping force of the valve to the seat has been established. A comparative analysis of the data obtained from simulation and real operational data has been presented.

Keywords: tank car, universal drain device, main valve, model

Объемы транспортировки наливных грузов в общей структуре перевозок как во внутрироссийском, так и в экспортном сообщении составляют примерно 17 % и имеют тенденцию к увеличению с устойчивым ростом порядка 8 % в год. К основным проблемам эксплуатации вагонов, предназначенных под наливные грузы, можно отнести утечки нефтепродуктов, приводящие к значительным финансовым и экологическим потерям.

Так, за период с января 2020 г. по декабрь 2024 г. на направлении Хабаровск–Комсомольск-на-Амуре Дальневосточной железной дороги зарегистрировано 59 инцидентов, связанных с утечкой наливных грузов. Из 59 случаев 49 пришлось на течи через универсальный сливной прибор железнодорожной цистерны [1].

С 60-х гг. прошлого века все железнодорожные цистерны для перевозки нефтепродуктов оборудуются универсальным сливным прибором (УСП) с двумя независимыми затворами [2] (рис. 1). Это устройство представляет собой простой запор-

ный механизм пробкового типа, с дополнительным нижним затвором в виде крышки.

В исследовании ключевым объектом изучения является сборочный узел «штанга–стойка–клапан–седло», так как именно его детали в первую очередь являются ответственными за сохранность груза [2].

Клапан представляет собой резинометаллическую сборную конструкцию, состоящую из корпуса, резиновой прокладки и нижней крышки, которая крепится болтам, фиксируя резиновое кольцо. К корпусу и нижней крышке приварены лепестки: верхние – предотвращают вращение клапана, упираясь в плечо стойки; нижние – центрируют положение клапана. Седло клапана располагается на броне листе котла, к нему с помощью болтов на фланец крепится стойка сливного прибора. В верхней части стойки находится втулка с трапециевидальной резьбой, через которую проходит резьбовая часть штанги. Её конец закрепляется в гнезде корпуса клапана с помощью шпилек. Резьба удерживает клапан в заданном положении [3, 4].

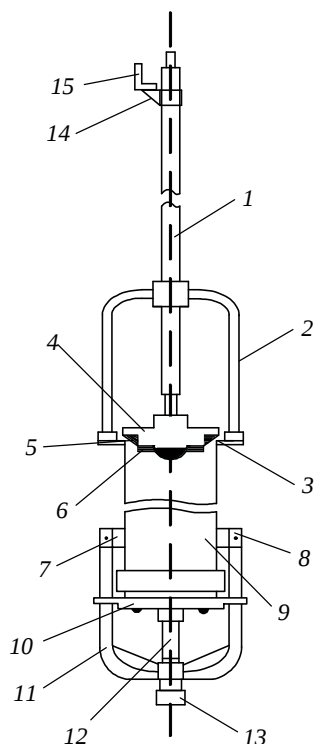


Рис. 1. Универсальный сливной прибор с двумя независимыми затворами: 1 – упорная штанга; 2 – стойка; 3 – седло стойки; 4 – корпус клапана; 5 – уплотнитель резиновый; 6 – прижимная крышка клапана; 7 – бонка; 8 – валик скобы; 9 – патрубок; 10 – нижняя крышка; 11 – скоба; 12 – винт нижней крышки; 13 – рукоятка; 14 – кронштейн; 15 – уголок

В состоянии покоя вагона на УСП действуют статические силы: собственный вес изделия, вес груза (полезная нагрузка), гидростатическое давление жидкости в котле, сила прижатия клапана к седлу [5]. На данном этапе исследования не рассматривались динамические силы, возникающие в процессе движения вагона, и температурные напряжения.

Расчеты напряженно-деформированного состояния универсального сливного прибора железнодорожной цистерны выполнены в программно-инженерном комплексе SolidWorks. Построение модели производилось согласно РД «Инструкция по ремонту и испытанию универсального сливного прибора цистерны» РД 32 ЦВ 053-2009 [6], «Основные параметры вагонов-цистерн и технические требования к оборудованию налива и слива» О+Р 579/3.

Для упрощения расчета модели из анализа были исключены детали нижнего запорного механизма, не влияющие на работу основного запорного органа. На рис. 2 приведена конечно-элементная модель универсального сливного прибора.

Качество конечно-элементной сетки играет ключевую роль для достоверности полученных результатов.

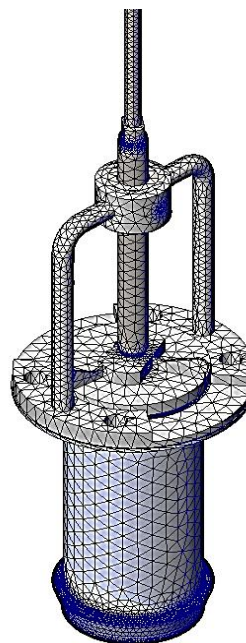


Рис. 2. Конечно-элементная модель универсального сливного прибора с двумя степенями защиты

Для определения качества КЭС использовалась проверка коэффициента Якобиана. Сетка хорошего качества имеет коэффициент Якобиана от 1 до 10 для минимум 90 % элементов. Эпюра качества сетки показала, что 99,93 % элементов имеет коэффициент Якобиана, равный 1; 0,07 % элементов имеют коэффициенты в диапазоне от 3,88 до 9,66. Таким образом, созданная конечно-элементная сетка имеет высокое качество.

При моделировании использован статический, нелинейный анализ. Заданы материалы, указаны контакты и взаимодействия между сборочными единицами конструкции.

В расчете учитывалась сила прижатия клапана к седлу, собственный вес изделия, гравитационная сила, направленная вертикально вниз. Ввиду отсутствия в нормативной документации силы прижатия клапана к седлу, сила задавалась постепенно от 5000 до 30 000 Н. Приложенная сила прижатия клапана к седлу приходится в центр корпуса клапана. Сам клапан поднимется от седла на 300 мм. Нерегламентированная сила прижатия клапана к седлу в эксплуатации приводит к недостаточной герметичности прибора и (или) изменению его положения относительно вертикальной оси.

В соответствии с ГОСТ 5520-2017 [7] для металлических деталей универсального сливного прибора принимаем сталь марки 09Г2С. Механические свойства стали определены согласно ГОСТ 19282-73 [8]. Уплотнительные резиновые кольца согласно РД 32 ЦВ 053-2009 руководящий документ «Инструкция по ремонту и испытанию универсального сливного прибора цистерны» [6] изготавливаются из резины марки 7-В-14-1 группы 1.

В проведенном исследовании максимальные эквивалентные напряжения в конструкции универсального сливного прибора воспринимаются стойкой клапана и составляют $226\,950\,144\text{ Н/м}^2$ и не превышают предела текучести материала ($\sigma_T = 275\,000\,000\text{ Н/м}^2$). Результаты расчета представлены на рис. 3. В целом конструкция имеет достаточный запас прочности за исключением отдельных участков.

Расчет результирующих перемещений (рис. 4) показал неравномерное опускание клапана на седло, со смещением на одну сторону. При закрытии со стороны штанги на клапан действует сила, направленная вертикально вниз, кроме этого, при вращении штанги в месте соединения возникают силы, поворачивающие корпус клапана, под дей-

ствием которых он смещается до упора лепестком в стойку. При контакте лепестка со стойкой возникает сила, противоположная приложенной. В результате корпус клапана смещается вокруг точки контакта, что приводит к изменению его положения относительно седла. Нарушается герметичность системы. Смещение клапана приводит к неравномерному износу резинового уплотнителя. Изношенный резиновый элемент конструкции перестает выполнять герметизирующие функции, что влечет за собой утечку груза.

Резиновое уплотнительное кольцо испытывает основные деформационные нагрузки. Результаты расчета эквивалентной деформации представлены на рис. 5.

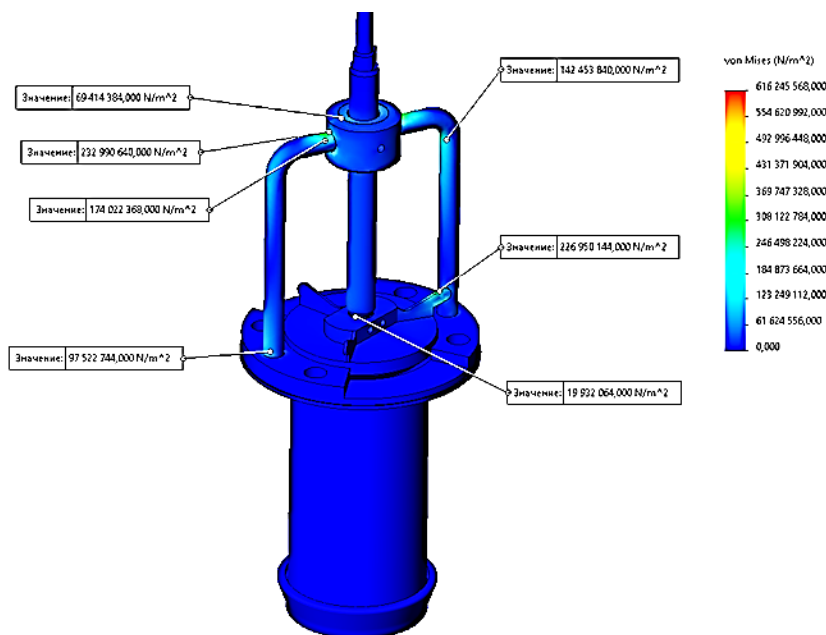


Рис. 3. Эквивалентные напряжения клапана сливного прибора

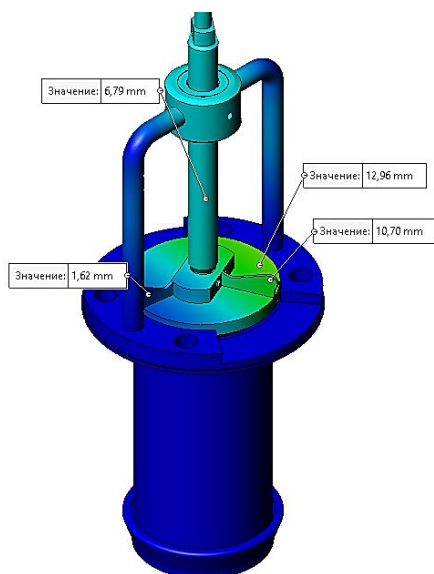


Рис. 4. Перемещения клапана сливного прибора

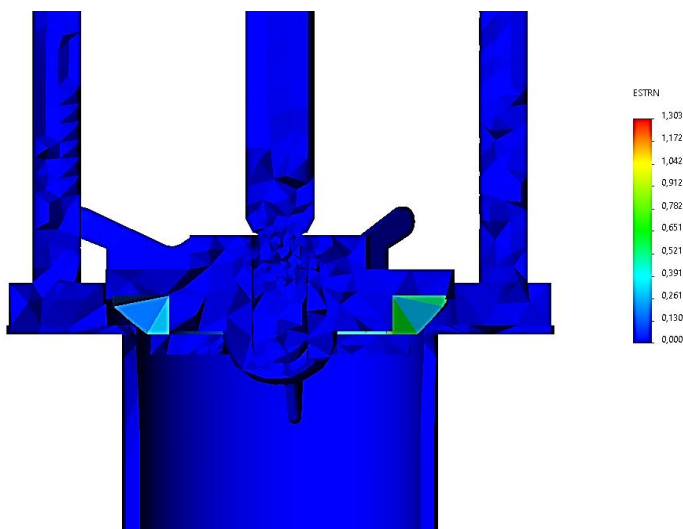


Рис. 5. Деформация резинового уплотнительного кольца клапана сливного прибора

Деформация резинового уплотнителя – поперечная, продольная практически отсутствует. При зондировании диаметрально противоположных зон кольца при приложении нагрузки, равной 20 000 Н, видно, что максимальное эквивалентное напряжение достигается в зоне, где уплотнитель имеет перекося, и значение эквивалентной деформации достигает 0,543 мм. Для зоны, в которой лепесток клапана уперся в стойку, деформация составила 0,205 мм.

Статистический анализ геометрических параметров уплотнителей, выведенных из эксплуатации, свидетельствует об адекватности модели. В марте 2025 г. на промыво-пропарочной станции «Феникс» г. Хабаровска проводились замеры основных параметров резинового кольца, таких как: диаметр, высота, вес, а также выявление дефектов различного рода. Замеры производились с помощью поверенных инструментов. Референтное значение, указанное в таблице, соответствует параметрам нового уплотнительного кольца.

Таблица

**Сравнительные характеристики
объёмных свойств резинового кольца,
полученные различными методами**

Параметр		Рефе- рентное значе- ние	Среднестати- стическое значе- ние эксплуати- руемых колец	Расчет- ное зна- чение
Диа- метр, мм	внешний	234	233,2	234
	внутрен- ний	160	160	160
Высота, мм		28	24,2	24,8
Толщина, мм		37	37	37
Средняя деформация		–	0,1348	0,13– 0,912

Также адекватность модели подтверждается схожимостью параметров объёмных свойств деталей универсального сливного прибора. Вес деталей в программе и в технической документации совпал. Так, вес основного клапана в сборе согласно [9] может составлять от 14 до 16 кг, вес по программе составил 15 кг.

С учетом генеральной совокупности сливных устройств цистерн на ДВОСТЖд выборочная, составила 503 уплотнительных кольца.

На всех изученных резиновых уплотнителях, выведенных из эксплуатации, контактная зона кольца с седлом смещена.

Выводы

- Построенная модель позволяет определить причины нарушения герметичности сливного прибора.
- Конструкционное исполнение универсального сливного прибора не обеспечивает постоянную герметичность, так как из-за сил трения, возникающих между стойкой и корпусом клапана, изменяется положение клапана относительно расположения седла.
- Вследствие ненормированной силы прижатия резиновый уплотнитель интенсивней выходит из строя.
- Построенная модель позволяет расчетным методом установить силу прижатия клапана к седлу. Расчет показал, оптимальная сила прижатия клапан к седлу лежит в диапазоне от 12 500 до 15 000 Н. Приложение силы до 12 000 Н не обеспечивает достаточного прилегания уплотнителя к седлу и, как следствие, приводит к разгерметизации. Приложение силы свыше 15 000 Н становится причиной перетягивания уплотнительного кольца и его разрушения, что влечет за собой возникновение капельной течи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомова А.О., Давыдова Е.Н. Проблематика утечки опасных грузов при транспортировке в вагонах-цистернах // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI в. 2024. Т. 1. С. 31–35.
2. Григорьев А.Н., Асламов Г.М., Кузьмин С.П. Железнодорожные цистерны. Устройство, эксплуатация и ремонт. Москва : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1959. 211 с.
3. Шадур Л.А. Развитие отечественного вагонного парка. Москва : Транспорт, 1988. 279 с.
4. Лукин, В.В., Петр С.А., Юрий П.Ф. Вагоны : учебник. Москва : Маршрут, 2004. 424 с. URL : <https://umczdt.ru/books/1206/225898/> (дата обращения: 20.04.2025).
5. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский [и др.]. Москва : Транспорт. 1965. 439 с.
6. РД «Инструкция по ремонту и испытанию универсального сливного прибора цистерны». РД 32 ЦВ 053-2009.
7. ГОСТ 5520 2017. Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. Введ. с 01.10.2018 г. Москва : Изд-во стандартов, 2017. 23 с.
8. ГОСТ 19282-1973*. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. Технические условия. Введ. с 01.01.1975. Москва, 1975. 30 с.
9. Производственная компания «АНДИ Групп» : офиц. сайт. URL : <https://andi-grupp.ru/> (дата обращения: 20.05.2025).

REFERENCES

1. Pakhomova A.O., Davydova E.N. Problematika utechki opasnykh грузов pri transportirovke v vagonah-tsisternah [Problematics of dangerous goods leakage during transport in tank wagons] // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI v. 2024. T. 1. S. 31–35.
2. Grigoriev A.N., Aslamov G.M., Kuzmin S.P. Zheleznodorozhnye tsisterny. Ustroystvo, ekspluatatsiya i remont [Railway tank cars. Design, operation and repair]. Moskva : Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatel'stvo, 1959. 211 s.

3. Shadur L.A. Razvitie otechestvennogo vagonnogo parka [Development of the domestic wagon park]. Moskva : Transport, 1988. 279 s.
4. Lukin V.V., Petr S.A., Yuri P.F. Vagony [Wagons] : uchebnik. Moskva : Marshrut, 2004. 424 s. URL : <https://umcздt.ru/books/1206/225898/> (data obrashcheniya: 20.04.2025).
5. Vagony. Konstruktsiya, teoriya i raschet [Wagons. Design, theory and calculation] / L.A. Shadur, I.I. Chelnokov, L.N. Nikol'skiy [et al.]. Moskva : Transport. 1965. 439 s.
6. RD «Instruktsiya po remontu i ispytaniyu universal'nogo slivnogo pribora tsisterny [RD 'Instruction on repair and testing of the universal tank draining device']». RD 32 TsV 053-2009.
7. GOST 5520-2017. Prokat tolstolistovoj iz nelegirovannoj i legirovannoj stali dlya kotlov i sosudov, rabotayushchih pod davleniyem [GOST 5520-2017. Heavy plate rolled products of non-alloy and alloy steel for boilers and vessels operating under pressure]. Tehnicheskie usloviya. Vved. s 01.10.2018. Moskva : Izd-vo standartov, 2017. 23 s.
8. GOST 19282-1973*. Stal' nizkolegirovannaya tolstolistovaya i shirokopolosnaya universal'naya [GOST 19282-1973* Low-alloyed thick plate and wide strip universal steel]. Tehnicheskie usloviya. Vved. s 01.01.1975. Moskva, 1975. 30 s.
9. Proizvodstvennaya kompaniya 'ANDI Group' [ANDI Group production company]. URL : <https://andi-grupp.ru/> (data obrashcheniya: 20.05.2025).

Информация об авторах

Ю.А. Давыдов – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог»;
Е.Н. Давыдова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог»;
А.О. Пахомова – аспирант кафедры «Транспорт железных дорог».

Information about the authors

Yu.A. Davydov – Doctor of Science (Engineering), Professor, Railway Transport Department;
E.N. Davydova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Railway Transport Department;
A.O. Pakhomova – Post-graduate Student, Railway Transport Department.

Статья поступила в редакцию 06.06.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.
The article was submitted: 06.06.2025; approved after reviewing: 25.06.2025; accepted for publication: 25.06.2025.

Научная статья
УДК 629.423
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-19-26

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Кабалык Юрий Сергеевич^{1, 2}, Букреев Сергей Витальевич²

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, kabalyk@list.ru

² ООО «ДЖЭТ ЛАБ», Москва, Россия

² s.v.bukreev2805@gmail.com

Аннотация. Рассматривается создание и исследование модели электровоза переменного тока посредством облачных вычислений в среде математического моделирования. В качестве среды моделирования используется модельно-ориентированная среда проектирования и математического моделирования REPEAT разработки АО «ИТЦ "ДЖЭТ"». Объектом моделирования выбран электровоз переменного тока, получающий питание от тяговой сети электрифицированных железных дорог. Модель состоит из тяговой сети, силового электрооборудования электровоза, тяговых двигателей, механической части и прицепленных вагонов. Результаты моделирования показывают сходимость результатов, полученных путем моделирования, и результатов натурных экспериментов. Модель позволяет исследовать как электромагнитные процессы в силовых электрических цепях, так и процессы движения поезда и развития боксования.

Ключевые слова: облачные вычисления, компьютерное моделирование, электровоз переменного тока, электромагнитные переходные процессы, трогание поезда, боксование

Original article

APPLICATION OF CLOUD COMPUTING FOR SIMULATION OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVE

Kabalyk Iurii S.^{1, 2}, Bukreev Sergey V.²

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, kabalyk@list.ru

² LLC «JET LAB», Moscow, Russia

² s.v.bukreev2805@gmail.com

Abstract. The paper considers the formation and research of an AC electric locomotive model using cloud computing in a mathematical simulating environment. The model-oriented design and mathematical simulating environment REPEAT developed by JSC ITC JET is used as a simulating environment. The simulation object is an AC electric locomotive powered by the traction network of electrified railways. The model consists of a traction network, electric locomotive power equipment, traction motors, mechanical parts and attached wagons. The simulation results show the convergence of the results obtained by simulating and the results of real experiments. The model allows us to study both electromagnetic processes in electric power circuits, as well as the processes of train movement and the development of slippage.

Keywords: cloud computing, computer simulation, AC locomotive, electromagnetic transients, train starting, slippage

Технология облачных вычислений заключается в том, что вычислительные мощности или их часть находятся не непосредственно у пользователя, а на удаленном компьютере, и предоставляются пользователю посредством сети Интернет или другого удаленного доступа. Такие технологии позволяют производить мощные вычисления на относительно «слабых» компьютерах, что может быть выгодно для конечного пользователя. Например, пользователь среднестатистического персонального компьютера с применением облачных вычислений может в короткий срок производить сложные вычисления, которые без применения облачных технологий заняли бы достаточно большой промежуток времени.

Наиболее популярное средство исследования процессов функционирования электроподвижного состава железных дорог – программы компьютерного моделирования, например такие как: *SimInTech*, *Matlab Simulink*, *Multisim*, *OrCAD* и др. Одним из недостатков таких программ является необходи-

мость установки их на компьютер, а также значительные затраты вычислительных ресурсов при моделировании. Технологии облачных вычислений позволяют устранить данные недостатки при сохранении функциональных возможностей.

Для проверки возможностей облачных вычислений было проведено моделирование электровоза переменного тока в модельно-ориентированной среде проектирования и математического моделирования REPEAT разработки АО «ИТЦ "ДЖЭТ"» (среда моделирования) [1]. Такая среда моделирования запускается в браузере на компьютере с подключением к Интернету. В качестве объекта моделирования выбран электровоз 2ЭС5К, находящийся на участке контактной сети, получающей питание от двух источников напряжения (имитация тяговых подстанций). В среде моделирования реализована одна секция электровоза 2ЭС5К. Общий вид созданной модели представлен на рис. 1.

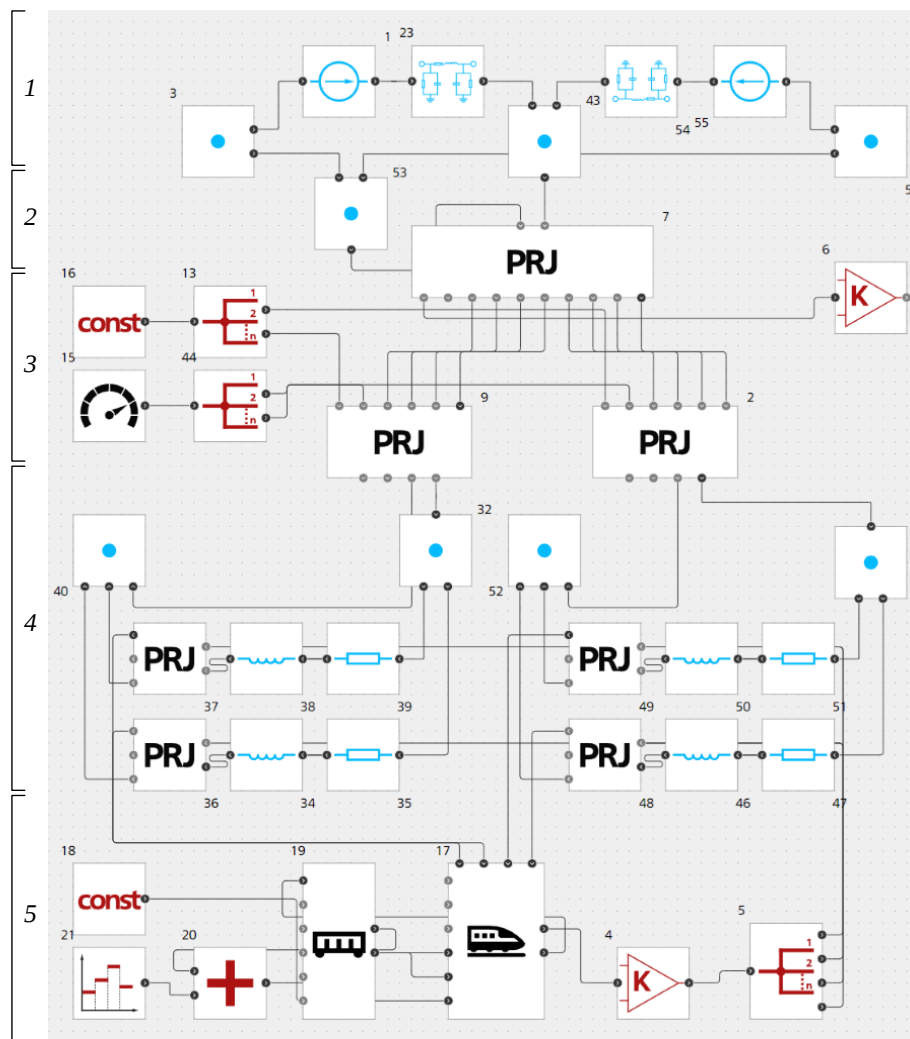


Рис. 1. Общий вид реализованной модели «Тяговая сеть – электровоз – поезд»

Модель разделена на следующие подмодели (нумерация в соответствии с рис. 1):

1) тяговая сеть, состоящая из двух источников напряжения, имитирующих тяговые подстанции, и двух линий с распределенными параметрами, имитирующих контактную сеть. Принято, что электровоз находится на середине межподстанционной зоны длиной 40 км. Параметры сопротивления контактной сети выбраны в соответствии с [2];

2) тяговый трансформатор электровоза. Подмодель содержит имитационную модель многообмоточного однофазного трансформатора и блоки измерения параметров. Имитационная модель многообмоточного однофазного трансформатора выполнена с применением блоков «Линейный однофазный трёхобмоточный трансформатор» среды REPEAT, соединенных в единую цепь, по количеству выводов и их назначению аналогичную электрической схеме тяговых обмоток тягового трансформатора ОНЦЭ-4350/25 электровоза 2ЭС5К. Параметры модели трансформатора выбраны в соответствии с [3, 4] и представлены в таблице. Содержание блока показано на рис. 2, а. Поскольку в модели используется три параллельных

блока «Линейный однофазный трёхобмоточный трансформатор», то параметры цепи намагничивания (индуктивность и активное сопротивление) в каждом из них были увеличены в три раза относительно параметров, представленных в таблице. Другие параметры этих блоков соответствовали параметрам из таблицы. Типовые блоки «Резистор» и «Катушка индуктивности», входящие в схему подмодели, имитируют сопротивления соответствующих электрических цепей. В подмодели также использованы типовые блоки «Амперметр» и «Вольтметр», которые формируют сигналы напряжения и тока на первичной обмотке трансформатора;

3) два выпрямительно-инверторных преобразователя (ВИП). Подмодель содержит восьмиплечевой мост с применением типового блока «Тиристор» среды REPEAT, а также блоки распределения импульсов управления, демпфирующие цепи плечей ВИП и блоки измерения параметров. Содержание подмодели представлено на рис. 2, б. ВИП реализует плавное 4-зонное зонно-фазовое регулирование выпрямленного напряжения. Регулируемый угол открытия тиристорov задается внешним источником

через вход in_6 в виде сигнала, численно равного углу регулирования в электрических градусах. На вход in_5 подается сигнал, равный мгновенному значению напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора. Подмодель содержит систему формирования углов открытия тиристоров с помощью типовых блоков «Больше», «Меньше» и «ПИД-регулятор». Нерегулируемые углы открытия тиристоров формируются в типовом блоке «Генератор прямоугольных импульсов». В подмодели также использованы типовые блоки «Амперметр» и «Вольтметр», формирующие сигналы напряжения и тока на выходе преобразователя;

4) четыре тяговых двигателя (ТЭД). Подмодель содержит имитационную модель двигателя постоянного тока на основе типового блока «Двигатель постоянного тока» среды REPEAT, а также цепи ослабления поля и блоки измерения параметров.

Содержание подмодели представлено на рис. 2, в. Частота вращения двигателя определяется внешним сигналом, поступающим на вход in_2 от блока «Локомотив (с проскальзыванием колёс)». Блок «Демпфер вращательного движения» 21, расположенный между блоками «Двигатель постоянного тока» 1 и «Источник угловой скорости» 20, необходим для обеспечения связи между источником и блоком с инерцией. Параметры модели ТЭД были установлены в соответствии с параметрами ТЭД НБ-514Б электровоза 2ЭС5К [5];

5) механическая часть электровоза и прикрепленный состав. Принято, что состав движется по прямому пути без уклонов и кривых. Подмодель выполнена на основе типовых блоков «Локомотив (с проскальзыванием колёс)» и «Прицеп с тормозной системой» среды REPEAT. Описание и параметры этих блоков представлены ниже.

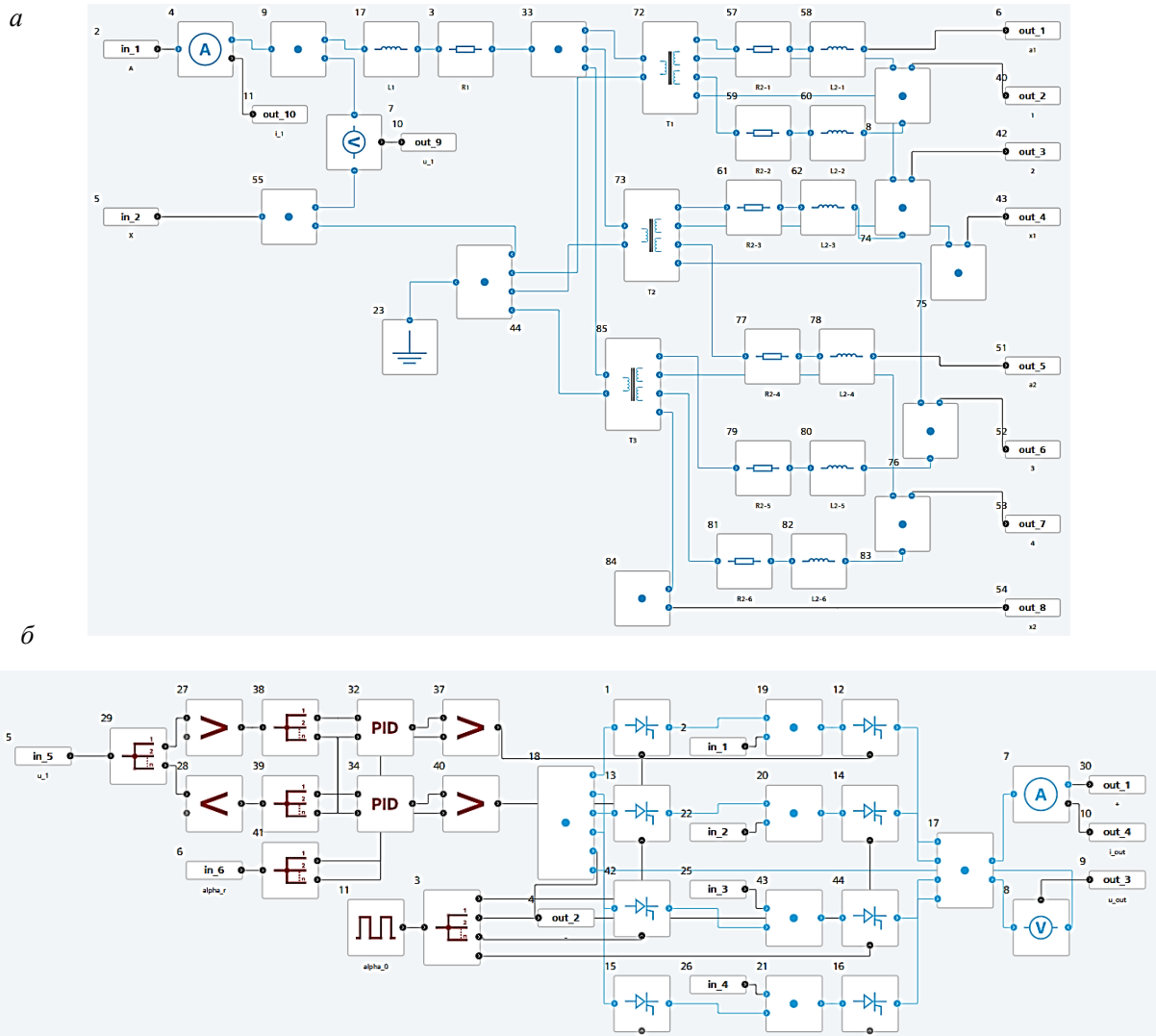


Рис. 2. Подмодели математической модели: а – тяговый трансформатор; б – выпрямительно-инверторный преобразователь; в – тяговый двигатель (см. также с. 22)

6

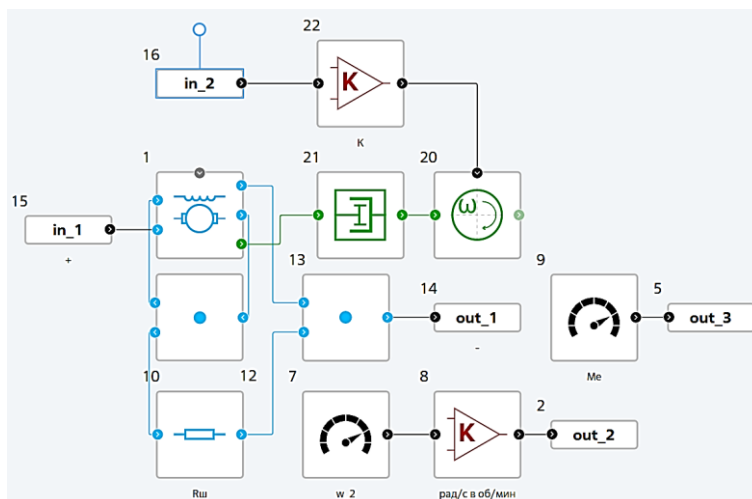


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 21)

Таблица

Параметры модели тягового трансформатора

Параметр	Значение
1. Параметры первичной обмотки: номинальное напряжение, В активное сопротивление, Ом индуктивность, Гн	25 000 0,8863 0,017
2. Параметры секции вторичной обмотки с напряжением 315 В: номинальное напряжение, В активное сопротивление, Ом индуктивность, Гн	315 0,0005625 $1,08 \cdot 10^{-5}$
3. Параметры секции вторичной обмотки с напряжением 630 В: номинальное напряжение, В активное сопротивление, Ом индуктивность, Гн	630 0,001125 $2,159 \cdot 10^{-5}$
4. Параметры ветви намагничивания: активное сопротивление, Ом индуктивность, Гн	168 900 57,232

Для проверки адекватности модели проведен анализ правильности функционирования электрической схемы и полученных параметров. В частности, проверялась возможность среды моделирования имитировать правильную работу полупроводниковых преобразователей энергии и тяговых двигателей. Для этого были сопоставлены осциллограммы напряжения и тока, полученные путем моделирования, с аналогичными осциллограммами, полученными путем натурных экспериментов. Сравнение осциллограмм представлено на рис. 3. Результаты натурных экспериментов взяты из [6–8].

Сравнение значений, рассчитанных путем моделирования, и экспериментальных значений показало следующую относительную погрешность между ними:

- углы сетевой коммутации γ_0 – 16 %;
- углы фазной коммутации γ_p – 5 %;
- коэффициент мощности – 8,4 %;
- коэффициент пульсаций тока двигателей – 10,1 %.

При этом можно считать, что осциллограммы, полученные путем моделирования, и экспериментальные осциллограммы имеют одинаковый характер изменения. Наличие негармонических пульсаций на экспериментальной осциллограмме напряжения на выходе ВИП является следствием влияния смежных электровазов на межподстанционном участке на кривую сетевого напряжения. На осциллограммах, полученных путем моделирования, можно наблюдать послекоммутационные колебания напряжения, которые вызываются процессами коммутации тока в ВИП и поддерживаются распределенными параметрами тяговой сети.

В разработанной модели используется блок «Локомотив» (рис. 1, блок 17), связанный с тяговыми двигателями через механические порты. В этот блок задаются параметры локомотива: радиус колес, момент инерции всех осей, масса локомотива, коэффициент сцепления с рельсами, коэффициент лобового сопротивления локомотива, коэффициент вязкого сопротивления локомотива и коэффициент трения качения. При этом параметрами служат не привычные для железнодорожной отрасли физические величины (кН, %, т и др.), а физические величины системы СИ (Н, градусы, кг и др.). Это приводит к тому, что исходные данные и параметры, получаемые на выходе блока, необходимо пересчитывать через соответствующие коэффициенты.

В блоке «Локомотив» рассчитывается вращающий момент колесных пар $M_{\text{конт}}$ по формуле

$$M_{\text{конт}} = M_{\text{тяг}} - M_{\text{торм}} - J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где $M_{\text{тяг}}$ – сумма вращающих моментов всех двигателей, приведенных к оси колесной пары, Н/м; $M_{\text{торм}}$ – тормозной момент, создаваемый дополнительными силами сопротивления движению локомотива, Н/м; J – момент инерции осей локомотива, кг/м²; ω – угловая частота вращения колесных пар, рад/с.

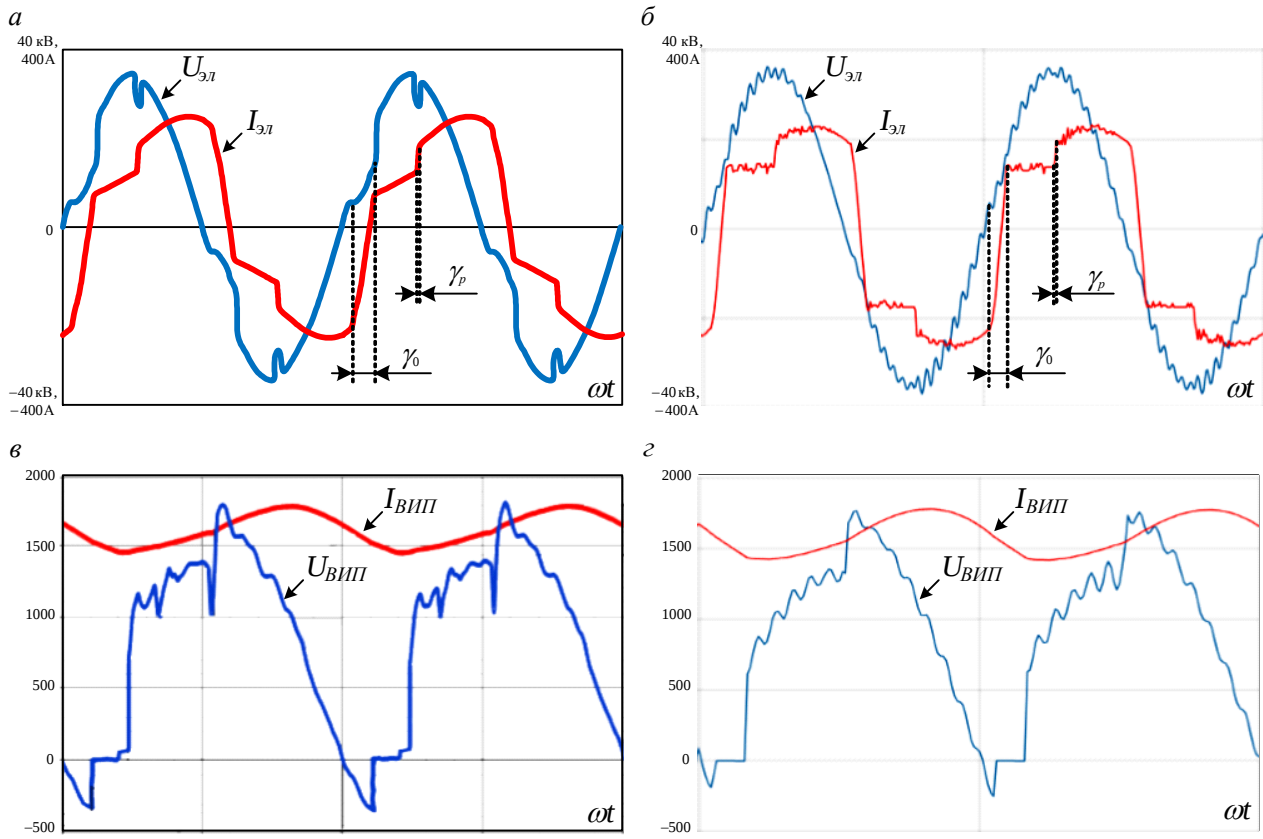


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования (б и з) с натурными экспериментами (а и в): а, б – осциллограммы тока $I_{эл}$ и напряжения $U_{эл}$ на токоприемнике электровоза; в, з – осциллограммы тока $I_{ВИП}$ и напряжения $U_{ВИП}$ на выходе ВИП

При расчете механических процессов блок «Локомотив (с проскальзыванием колес)» учитывает процесс появления боксования, наступающий при выполнении условия

$$M_{конт} > F_{сц, \max} r_k, \quad (2)$$

где r_k – радиус бандажа колесной пары по кругу катания, м; $F_{сц, \max}$ – максимальная сила сцепления, Н, определяемая по формуле

$$F_{сц, \max} = m_l g K_{сц} \cos \alpha, \quad (3)$$

где m_l – масса локомотива, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; $K_{сц}$ – коэффициент сцепления колес с рельсами; α – уклон пути, град.

При расчете движения поезда в блоке также учитываются следующие силы:

– сила аэродинамического сопротивления, определяемая по формуле

$$F_{аэро} = K_{аэро} v_{сумм} |v_{сумм}| + K_{вязк} v_{сумм}, \quad (4)$$

где $K_{аэро}$ – коэффициент лобового сопротивления локомотива, кг/м; $v_{сумм}$ – сумма скоростей поезда и встречного ветра, м/с; $K_{вязк}$ – коэффициент вязкого сопротивления локомотива, кг/с;

– сила скатывания поезда по уклону, определяемая по формуле

$$F_{скат} = m_l g \sin \alpha; \quad (5)$$

– сила сцепления, определяемая по формуле

$$F_{сц} = \frac{K_{тр} m_l g \cos \alpha}{r_k} \operatorname{sgn}(\omega), \quad (6)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трения качения, м; $\operatorname{sgn}(\omega)$ – знак частоты вращения колесных пар ($\pm$), что также обозначает направление движения;

– сила сопротивления прицепленных вагонов $F_{ваг}$, которая подается в блок через соответствующий входной порт от блока «Прицеп с тормозной системой».

Расчет движения поезда производится в зависимости от наличия боксования на локомотиве следующим образом:

– при отсутствии боксования:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{тяг} - M_{торм} - F_{аэро} r_k - F_{скат} r_k - F_{сцеп} r_k - F_{ваг} r_k}{J + m_n r_k^2}, \quad (7)$$

где m_n – масса поезда, кг;

– при наличии боксования:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{тяг} - M_{торм} - M_{конт}}{J}, \quad (8)$$

$$\frac{dV_n}{dt} = \frac{M_{\text{конт}}/r_k - F_{\text{аэро}} - F_{\text{скат}} - F_{\text{сцеп}} - F_{\text{ваг}}}{m_n} \quad (9)$$

Проверка функционирования созданной модели проводилось для двух условий моделирования:

1) один прицепленный вагон и небольшой ток тяговых двигателей (оценка возможности расчета процесса трогания поезда);

2) большое количество прицепленных вагонов и большой ток тяговых двигателей (оценка развития процесса буксования).

При первом условии моделирования поезд состоял из одной секции электровоза 2ЭС5К и одного вагона массой 68 т. При этом ВИП работал на первой зоне с большим углом регулирования, в результате чего на его выходе создавалось напряжение 50 В. Автоматическое поддержание силы тока на заданном уровне, применяемое на электровозах 2ЭС5К, в рассматриваемой модели не реализовано. Результаты моделирования представлены на рис. 4, из которых видно, что за отрезок времени продолжительностью 20 с:

– ток на выходе ВИП сначала возрастает до 700 А, а затем снижается и к концу отрезка времени достигает до 260 А;

– скорость движения локомотива достигает 1,33 м/с, или 4,8 км/ч. При этом частота вращения колесных пар увеличивается пропорционально скорости поезда, что говорит об отсутствии проскальзывания колес с рельсами (отсутствии буксования колесных пар).

Описанное выше моделирование 20-секундной работы схемы заняло 12 с реального времени. Моделирование осуществлялось на ноутбуке со следующими основными параметрами: ОС Windows 11, процессор AMD Ryzen 3 4300U, 8 ГБ оперативной памяти. При запущенном моделировании загрузка процессора изменялась в диапазоне от 7 до 14 %, а в режиме ожидания – становилась равной в среднем 4 %.

При втором условии моделирования количество вагонов увеличено до 40, каждый массой 68 т. В самом начале моделирования ВИП работает на первой зоне с небольшим углом регулирования, в результате на его выходе создается напряжение 250 В, что при отсутствии вращения двигателей будет создавать большой пусковой ток. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

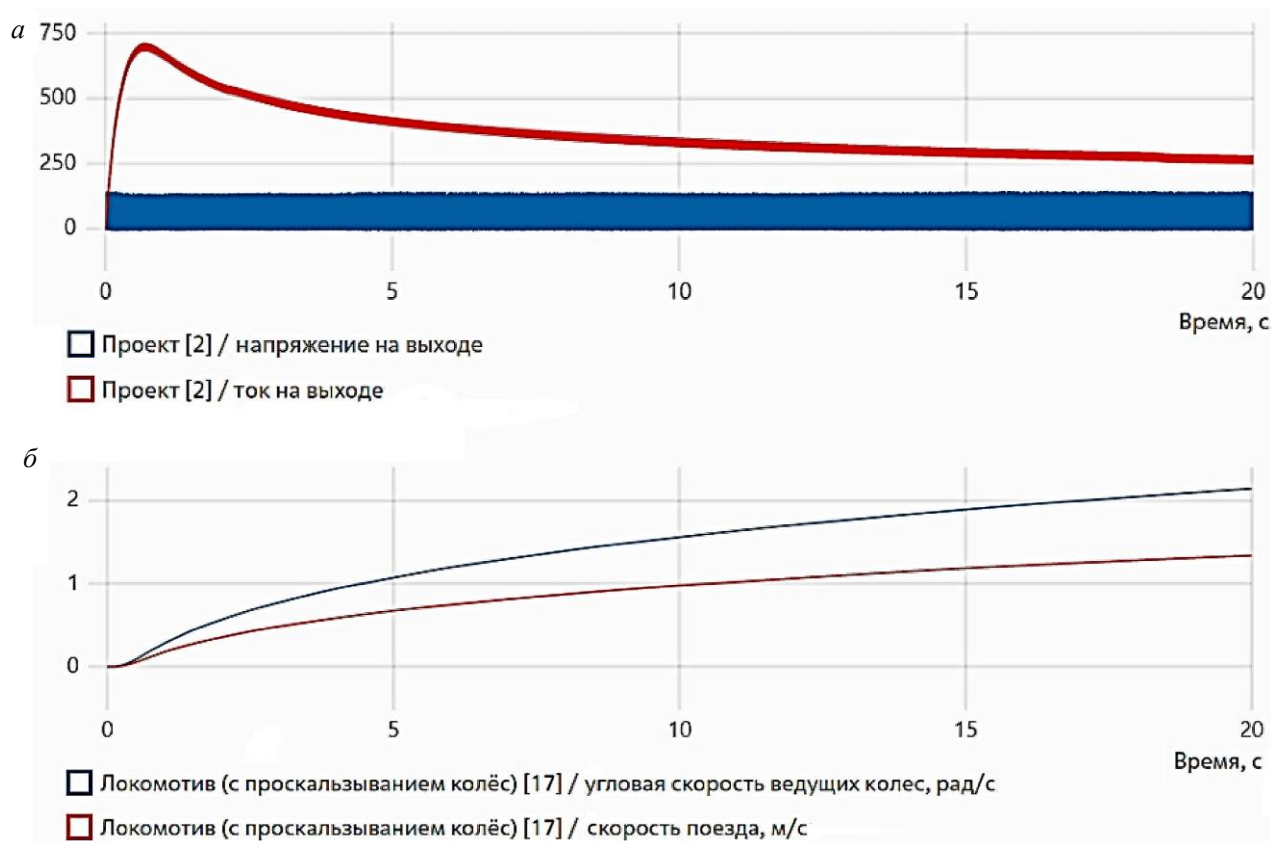


Рис. 4. Результаты моделирования трогания локомотива с одним вагоном и низким напряжением на двигателях:

а – напряжение на выходе ВИП (синяя линия) и ток на выходе ВИП (красная линия); б – угловая скорость вращения колесных пар локомотива (синяя линия) и скорость движения поезда (красная линия)

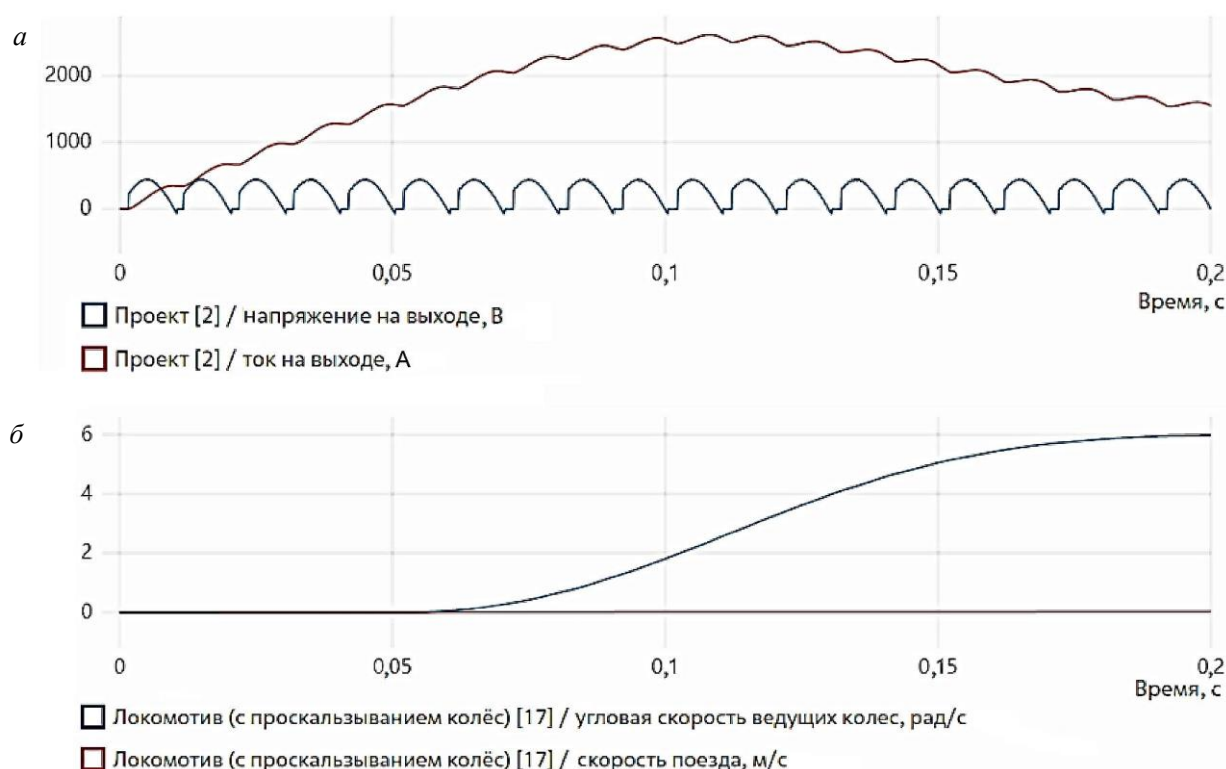


Рис. 5. Результаты моделирования трогания локомотива с 40 вагонами и высоким напряжением на двигателях:
а – напряжение на выходе ВИП (синяя линия) и ток на выходе ВИП (красная линия); б – угловая скорость вращения колесных пар локомотива (синяя линия) и скорость движения поезда (красная линия)

Из результатов моделирования (рис. 5) видно, что при высоком напряжении на выходе ВИП ток тяговых двигателей резко увеличивается до больших значений, что приводит к резкому увеличению угловой скорости ведущих колес до 6 рад/с (57 об/мин). При этом скорость движения поезда остается практически нулевой, что свидетельствует о срыве сцепления в контакте «колесо–рельс» и образовании процесса боксования колесных пар. Увеличение частоты вращения двигателя при боксовании колесных пар приводит к небольшому снижению частоты вращения двигателей вследствие увеличения противо-эдс в обмотке якоря.

Описанное выше моделирование 0,2-секундной работы схемы заняло 4 с реального времени. Загрузка процессора при этом была аналогична нагрузке при первом условии моделирования (рис. 4).

Низкая нагрузка процессора компьютера при проведении моделирования свидетельствует о том, что моделирование в программе *REPEAT* практически не загружает ресурсы компьютера, что позво-

ляет осуществлять её на относительно недорогих компьютерах. Загрузка памяти компьютера, в основном, зависит от количества точек получаемых графиков и может регулироваться изменением шага дискретизации графиков.

Вывод: использование облачных вычислений с применением программы *REPEAT* дает возможность моделировать силовую схему электровоза переменного тока и процесс трогания (движения) поезда. Программа позволяет создавать сложные модели и строить графики изменения рассматриваемых параметров, что может быть также использовано при моделировании других технических объектов и систем. При этом вычислительные ресурсы компьютера практически не тратятся, поскольку основные вычисления производятся на удаленных серверах. Программа не требует установки на компьютер, вся работа с ней осуществляется в браузере.

Статья подготовлена при поддержке гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. REPEAT : платформа модельно-ориентированной среды проектирования и математического моделирования. Москва : АО «ИТЦ "ДЖЭТ"», 2024. URL : <https://repeatlab.ru> (дата обращения: 01.04.2025).
2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учебник для вузов железнодорожного транспорта. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1982. 528 с.

3. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 4. Описание и работа, электрические аппараты и оборудование. ИМБ.661142.009 РЭ4 (ЗТС.001.012 РЭ4). Новочеркасск, 2004.
4. Малютин А.Ю. Применение маловентильных преобразователей в системе питания вспомогательных цепей электровозов переменного тока : дис. ... канд. техн. наук / Артем Юрьевич Малютин. Москва : МГУПС (МИИТ), 2017. 149 с.
5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 3. Описание и работа, электрические машины. ИМБ.661142.009 РЭ3 (ЗТС.001.012 РЭ3). Новочеркасск, 2004.
6. Волчек Т.В. Повышение эффективности системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов переменного тока : дис. ... канд. техн. наук / Татьяна Витальевна Волчек. Иркутск : ИрГУПС, 2022. 146 с.
7. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе 3ЭС5К / А.С. Копанев, П.А. Хрипков, В.М. Волков, П.С. Вольт // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2010. № 2. С. 14–36.
8. Фошкина Н.В., Малышев В.М., Козловский И.Л. Применение компенсатора реактивной мощности на электровозе 3ЭС5К // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2010. № 2. С. 37–42.

REFERENCES

1. REPEAT : Platforma model'no-orientirovannoj sredy proektirovaniya i matematicheskogo modelirovaniya [A platform for model-oriented design and mathematical modeling environment]. Moskva, JSC «ITC "JET"», 2024. URL : <https://repeatlab.ru> (data obrashcheniya: 01.04.2025).
2. Marquardt K.G. Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [Power supply of electrified railways] : uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. 4-e izd., pererab. i dop. Moskva : Transport, 1982. 528 s.
3. Elektrovoz magistral'ny 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 4. Opisaniye i rabota, elektricheskiye apparaty i oborudovaniye [Mainline Electric Locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual. Book 4: Description and operation, electrical apparatus and equipment]. IMB.661142.009 RE4 (ZTS.001.012 RE4). NovoCherkassk, 2004.
4. Malyutin A.Yu. Primeneniye maloventil'nykh preobrazovatelej v sisteme pitaniya vspomogatel'nykh tsepej elektrovozov peremennogo toka [Application of low-valve converters in the power supply System of Auxiliary Circuits of AC electric locomotives] : dis. ... cand. tehn. nauk / Artem Yuryevich Malyutin. Moskva : MGUPS (MIIT), 2017. 149 s.
5. Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 3. Opisaniye i rabota, elektricheskiye mashiny [Mainline Electric Locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual. Book 3: Description and operation, electrical machines]. IMB.661142.009 RE3 (ZTS.001.012 RE3). NovoCherkassk, 2004.
6. Volchek T.V. Povysheniye effektivnosti sistemy oslableniya vzbuzhdeniya tyagovykh elektrodvigatelyeley elektrovozov peremennogo toka [Increasing the efficiency of the excitation attenuation system of traction electric motors of AC electric locomotives]: dis. ... cand. tehn. nauk / Tatyana Vitalyevna Volchek. Irkutsk : IrGUPS, 2022. 146 s.
7. Ispytaniya sistemy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na elektrovoze 3ES5K [Testing the reactive power compensation system on the 3ES5K electric locomotive] / A.S. Kopanев, P.A. Khripkov, V.M. Volkov, P.S. Volt // Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya. 2010. № 2. S. 14–36.
8. Foshkina N.V., Malyshev V.M., Kozlovsky I.L. Primeneniye kompensatora reaktivnoy moshchnosti na elektrovoze 3ES5K [Application of a reactive power compensator on the 3ES5K electric locomotive] // Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya. 2010. № 2. S. 37–42.

Информация об авторах

Ю.С. Кабалык – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог», инженер 1-й категории ООО «ДЖЭТ ЛАБ»;
С.В. Букреев – директор ООО «ДЖЭТ ЛАБ».

Information about the authors

Y.S. Kabalyk – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Railway Transport Department, 1st category Engineer, JET LAB LLC;
S.V. Bukreev – Director of JET LAB LLC.

Статья поступила в редакцию 14.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 03.06.2025.
The article was submitted: 14.04.2025; approved after reviewing: 03.06.2025; accepted for publication: 03.06.2025.

Научная статья
УДК 681.518.5:656.257
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-27-34

ЦИФРОВЫЕ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ: ЕВРОПЕЙСКИЙ ОПЫТ И РЕАЛИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Канарский Вадим Андреевич¹, Кулалев Евгений Сергеевич²

^{1, 2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ vkanarsky@ro.ru

² ekulalev@mail.ru

Аннотация. Уже более ста лет на железных дорогах применяются различные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). За это время они прошли значительный путь развития: от рычажных систем управления и электромеханических реле до внедрения микропроцессоров и современных вычислительных средств. В настоящее время европейские системы ЖАТ проходят новый этап развития – «Технология сигнализации 4.0». Цифровые централизации (станционные СЖАТ) строятся на модульной архитектуре и стандартизированных интерфейсах, что обеспечивает совместимость компонентов различных производителей, а также гибкость и масштабируемость. Децентрализация полевого оборудования, разделение каналов питания и передачи данных, использование оптоволокна, IP-адресация и облачные технологии делают цифровую централизацию более современной и эффективной в отличие от проприетарных решений, используемых на российских железных дорогах. Представлен обзор текущего мирового опыта в этой области, рассмотрено состояние российских систем ЖАТ и обозначены возможные направления их развития.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика, система, СЖАТ, централизация, микропроцессорный, цифровой, технология, стандарт, протокол

Original article

DIGITAL INTERLOCKING: EUROPEAN EXPERIENCE AND REALITIES OF DOMESTIC RAILWAY AUTOMATICS

Kanarsky Vadim A.¹, Kulalev Evgeny S.²

^{1, 2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ vkanarsky@ro.ru

² ekulalev@mail.ru

Abstract. Various railroad automation and telemechanics (RAT) systems have been used on railroads for more than a hundred years. Over that time, they have gone through a significant development path: from lever control systems and electromechanical relays to the introduction of microprocessors and modern computing facilities. Today, European RAT systems are undergoing a new stage of development – «Signaling Technology 4.0». Digital interlocking systems (station-based RAT systems) are based on modular architecture and standardized interfaces, which ensures compatibility of components from different manufacturers, as well as flexibility and scalability. Decentralization of field equipment, separation of power and data transmission channels, use of fiber optics, IP addressing and cloud technologies make digital interlocking system more advanced and efficient compared to the proprietary solutions used on Russian railroads. This article reviews current global experience in this area, considers the state of Russian railroad automation systems and identifies possible directions of their development.

Keywords: railway automation, system, RAT, interlocking, microprocessor, digital, technology, standard, protocol

От механических рычагов к IP-сетям

Одним из первых видов автоматизированного передвижения в России был железнодорожный транспорт. Постепенно с течением времени он набирал обороты, приобретая культурную ценность и технологические изменения. Вместе с тем повышалась роль железной дороги в экономике, что привело к серьезным требованиям организованного и безопасного движения поездов.

В середине 50-х гг. XIX в. англичанин Джон Саксби сконструировал «прародительницу» системы централизации. Он поместил в сигнальной раме

все рычаги, которые регулировали стрелки и сигналы – в результате был создан первый аппарат с взаимным замыканием [1].

Царская Россия старалась не отставать, и в 1884 г. профессором Я.Н. Гордиенко и инженером Л.Д. Вурцелем была разработана отечественная механическая централизация с жесткой трубчатой передачей и внедрена на станции Саблино. Управление стрелками и сигналами производилось с поста при помощи стрелочных и сигнальных рычагов, связанных гибкими тягами со стрелочными и сигнальными приводами.

В 1904 г. начальник службы телеграфа Рязано-Уральской дороги А.П. Руднев разработал и внедрил систему ключевой зависимости, работа которой заключается во взаимном замыкании стрелок и сигналов посредством стрелочных и сигнальных контрольных замков.

Дальнейшее развитие отечественных станционных систем было связано с использованием возможностей электрического тока. С целью повышения безопасности и снижения времени приготовления маршрута этих показателей разрабатывались системы электрической централизации (ЭЦ), которые значительно улучшили эффективность работы железнодорожных станций. Первая система электрической централизации имела электрическую связь между рукоятками и управляемыми объектами, а также механическое взаимодействие между стрелочными и сигнальными рукоятками. Однако с развитием технологий и усложнением требований безопасности, механическое взаимодействие не могло полностью удовлетворить нужды, особенно в части контроля состояния путей и стрелок, исключения перевода стрелок при занятии пути составом и других операций. Это привело к созданию электромеханической зависимости, где использовались электромагнитные защелки для обеспечения блокировки и замыкания рукояток. В дальнейшем на крупных станциях стала использоваться система электрозащелочной централизации, которая исключала механические замыкания и использовала только электрозащелки, что позволило значительно упростить конструкцию и уменьшить размеры аппарата управления.

Появившиеся в 30-х гг. XX в. релейные системы электрической централизации с незамыкаемыми рукоятками и кнопками управления стали основным типом ЭЦ. В этих системах взаимозамыкание между стрелками и светофорами осуществлялось с помощью реле, что позволило обеспечить более гибкую и безопасную работу станции, автоматизируя процессы и повышая надежность.

С 1960 г. стала внедряться блочная система ЭЦ (блочно-маршрутная релейная централизация, БМРЦ). Вначале блоки охватывали только исполнительную группу реле, а с 1966 г. – и наборную группу. Эта система позволила ускорить строительство, упростить эксплуатацию, сократить сроки проектирования, тем самым став самой распространенной системой ЭЦ, до сих пор используемой на многих российских станциях [2].

Однако релейные ЭЦ имеют ряд недостатков, таких как дорогостоящая эксплуатация, высокая энергоемкость, большие размеры, быстроедействие системы, значительные трудозатраты на обслуживание. С наступлением третьей промышленной революции и развитием программируемых контроллеров, микропроцессоров и вычислительной техники стали разрабатываться более совершенные виды электрической централизации [3].

В релейно-процессорной (гибридной) централизации логические функции управления, не связан-

ные с безопасностью движения (например, наборная группа БМРЦ), выполняются вычислительными средствами. Перевод стрелок, открытие светофоров и другие ответственные команды реализованы традиционным способом на реле 1-го класса надежности. В микропроцессорных централизациях все схемы реализованы на полупроводниковых элементах. В общем случае в таких централизациях вместо кнопочных аппаратов управления стали использовать автоматизированные рабочие места дежурного по станции (АРМ ДСП), реализованные на промышленных компьютерах [4].

В настоящее время в эпоху цифровизации и индустрии 4.0 развиваются системы цифровой централизации, впервые разработанные и популяризированные компаниями в Германии Siemens Mobility и DB InfraGO [5]. Применение в данном контексте понятия «цифровизация» более широкое – электрические централизации и до этого использовали дискретные (цифровые) сигналы (участок занят/свободен, стрелка в плюсе/минусе). Настоящий смысл цифровой централизации заключается в стандартизации интерфейсов и использовании цифровых технологий для интеграции и централизованного управления различными системами железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающих совместимость и гибкость независимо от производителя.

Появление таких новых решений на европейских железных дорогах специалисты компании Siemens обозначили как новый этап развития систем управления движением поездов – «Технология Сигнализации 4.0».

Проблема проприетарных решений

В европейской железнодорожной автоматике релейная аппаратура вытеснялась полупроводниковой уже с 1980-х гг. Все логические взаимозависимости были перенесены с электромеханических реле на печатные платы и интегральные схемы и запрограммированы в соответствии с индивидуальными особенностями станции с помощью программного обеспечения. Это привело к появлению электронных блокировок (нем. Elektronisches Stellwerk (ESTW)). Однако в будущем еще более узко проявился один серьезный недостаток с точки зрения оператора: зависимость от собственности производителя. Каждый производитель станционной железнодорожной автоматики разрабатывает свою систему (централизацию) и должен предоставить доказательства того, что функции этой системы безопасны, в ходе очень сложного процесса утверждения.

Получаемый сертификат безопасности практически завершает разработку централизации. Это приводит к тому, что исключается возможность использования: например, стрелочной привод производителя А в системе производителя В. Все, что ремонтируется, переоборудуется или перестраивается в станционной системе перед повторным утверждением, должно быть снова проверено производителем системы на безопасность.

Железнодорожная дирекция инфраструктуры с момента ввода в эксплуатацию новой станционной системы переходит в зависимость от ее производителя, рассчитанную на 30 и более лет. Прекращение производства компонентов приводит к проблемам устаревания, которые в настоящее время все чаще становятся очевидными даже в технологиях ESTW. Как следствие – если определенные компоненты больше не доступны для поставки, результатом является новая сборка всей системы сигнализации, что выражается в серьезном денежном эквиваленте. Получается любопытная ситуация: денежные средства не могут быть использованы для обновления старых механических и релейных централизаций, но должны быть инвестированы в относительно молодые микропроцессорные системы. При этом устаревшие централизации продолжают эксплуатироваться, поиск и устранение отказов в них требует подготовки квалифицированного обслуживающего персонала.

Для разрешения этой ситуации была представлена новая концепция станционных систем, получившая название «цифровые централизации» (нем. Digitaler Stellwerk (DSTW)). Идея заключается в том, что следует определить основные функции и функциональные модули новой цифровой централизации, которые будут работать по интерфейсам, единообразно заданным компанией железных дорог. Это подобно тому, как в Евросоюзе 28 декабря 2024 г. общепринятым разъемом для зарядки гаджетов признали USB-C (Type-C), благодаря чему можно будет заряжать любую новую модель мобильного телефона, независимо от производителя. Таким образом, планируется сделать совместимыми стрелочные электроприводы и сигнальные установки всех производителей. Это в свою очередь решает проблемы устаревания компонентов – производители могут предлагать отдельные компоненты без необходимости разработки новой станционной системы [5].

Консорциум EULYNX

Реализация цифровой централизации потребовала разработки принципиально новой эталонной архитектуры построения систем железнодорожной автоматики. Так, ещё в 2014 г. несколько европейских железных дорог создали рабочую группу («инициативу») по изучению возможностей стандартизации интерфейсов, которая позднее была преобразована в европейский отраслевой консорциум EULYNX (англ. *European Initiative to Linking Interlocking Systems*, *Европейская модель объединения устройств железнодорожной автоматики*). Полноправными членами EULYNX, которые занялись созданием одноименного стандарта (рис. 1), были шесть европейских операторов железнодорожной инфраструктуры:

- DB Netz AG (позднее DB InfraGO) Германия;
- ProRail, Нидерланды;
- Infrabel, Бельгия;
- Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), Франция;

- Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois (CFL), Люксембург;

- Network Rail, Великобритания.

Со временем этот список дополнили:

- Adif, Испания;
- Bane NOR, Норвегия;
- Centralny Port Komunikacyjny (CPK), Польша;
- HŽ Infrastruktura, Хорватия;
- Indian Railways, Индия;
- ÖBB Infrastruktur, Австрия;
- Rete Ferroviaria Italiana (RFI), Италия;
- Saudi Arabia Railways (SAR), Саудовская Аравия;
- Správa železnic, Чешская Республика;
- SŽ-Infrastruktura (SŽ), Словения;
- Trafikverket, Швеция;
- Väylä, Финляндия [6].

Основная деятельность EULYNX связана с разработкой спецификаций интерфейсов. Полученная в результате модульная архитектура и стандартизированные интерфейсы обеспечивают разделение между постом электрической централизации и напольными устройствами. Такой подход оптимизирует использование отдельных компонентов системы, снижает степень привязки к поставщику и сокращает общие затраты на протяжении жизненного цикла системы [7].

За основу межсетевого взаимодействия принята модель TCP/IP (англ. Transmission Control Protocol/Internet Protocol – протокол управления передачей/интернет-протокол). Однако данный протокол обладает врожденными уязвимостями и требует дополнительных механизмов защиты при использовании в критически важных системах.

Для систем железнодорожной автоматики и телемеханики, где отказоустойчивость является обязательным требованием, был разработан специализированный протокол RaSTA [8, 9] (Rail Safe Transport Application – железнодорожный безопасный транспортный протокол). RaSTA – это сетевой протокол с гарантированным уровнем безопасности, обеспечивающий:

- аутентичность – подтверждение источника сообщений;
- целостность – защиту от несанкционированного изменения данных;
- своевременность – доставку сообщений в строго заданные временные рамки;
- правильную последовательность – исключение переупорядочивания команд при передаче.

Однако для того, чтобы можно было интегрировать решения от разных производителей в рамках единой архитектуры, консорциумом EULYNX было предусмотрено семейство стандартизированных коммуникационных интерфейсов (см. рис. 1) SCI (англ. *standardized communication interface*): SCI-RBC (интерфейс взаимодействия с центром радиоблокировки, англ. *Radio Block Centre*), SCI-ILS (интерфейс взаимодействия с соседним централизованным пунктом, англ. *Interlocking System*), SCI-LX (интерфейс взаимо-

действия с железнодорожным переездом, англ. *level crossing*), SCI-CC (интерфейс взаимодействия с диспетчерским центром, англ. *Command & Control*), SCI-IO (интерфейс взаимодействия с универсальными цифровыми входными и выходными сигналами, англ. *Input/Output*), SCI-LS (интерфейс взаимодействия со светофорами, англ. *Light Signal*) (рис. 2), SCI-

TDS (интерфейс взаимодействия с датчиками обнаружения свободы путей (поездов), англ. *Train Detection System*), SCI-P (интерфейс взаимодействия со стрелочными электроприводами, англ. *Point*) [10].

Таким образом, представленный стек протоколов позволяет решать ряд ключевых задач (таблица).

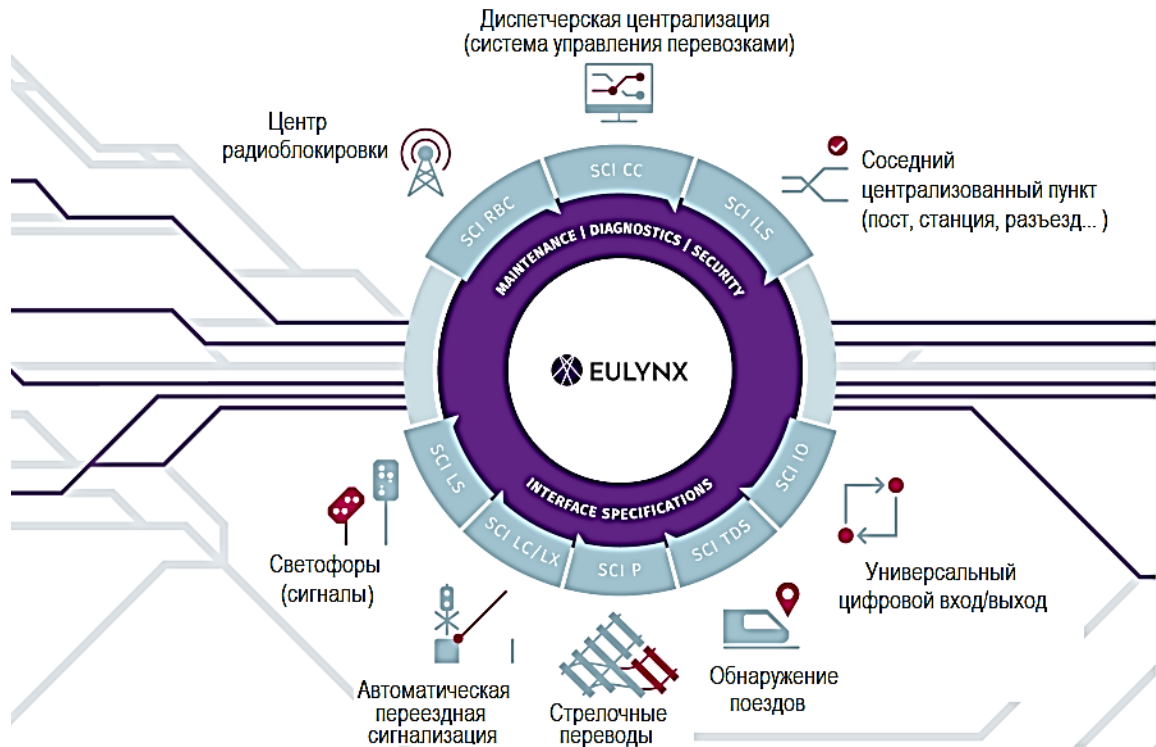


Рис. 1. Европейская модель объединения систем и устройств железнодорожной автоматики



Рис. 2. Схема взаимодействия диспетчерского центра со светофором через стек протоколов

Таблица

Роль сетевых уровней
в архитектуре цифровой централизации

Уровень	Предоставляемая возможность	Решаемая проблема
SCI	Стандартизированное взаимодействие между устройствами ж.-д. автоматики	Зависимость от оборудования одного производителя, который использовал свои форматы
RaSTA	Безопасность и надёжность передачи команд, контроль доставки, защита от ошибок и сбоев поверх TCP/IP	Без RaSTA протокол TCP/IP не гарантирует своевременную доставку (недопустимо для СЖАТ), уязвим к подмене данных, повторным атакам и сбоям
TCP/IP	Универсальная передача	Исключает необходимость прокладывать отдельные кабели для каждого устройства, как в традиционных электрических централизациях с кабельными сетями на медных жилах

Технические возможности цифровых СЖАТ

Пилотный проект DSTW был реализован в Ан-наберг-Бухольце в 2013 г. и ознаменовал смену парадигмы в области систем обеспечения движения поездов. В сентябре 2019 г. компания Siemens Mobility ввела в эксплуатацию вторую в Германии систему цифровой централизации (Варнемюнд) [11]. Главная особенность этой системы – децентрализованное управление. Оборудование устанавливается прямо рядом с напольными устройствами (стрелками, сигналами и т.д.) в специальных напольных шкафах FEAK (англ. Field device connection box, путевой шкаф с устройствами). В них размещаются объектные контроллеры, аппаратура передачи данных и устройства электроснабжения (включая средства защиты). Всё это оборудование рассчитано на работу в расширенном диапазоне температур и монтируется на стандартные рейки [12].

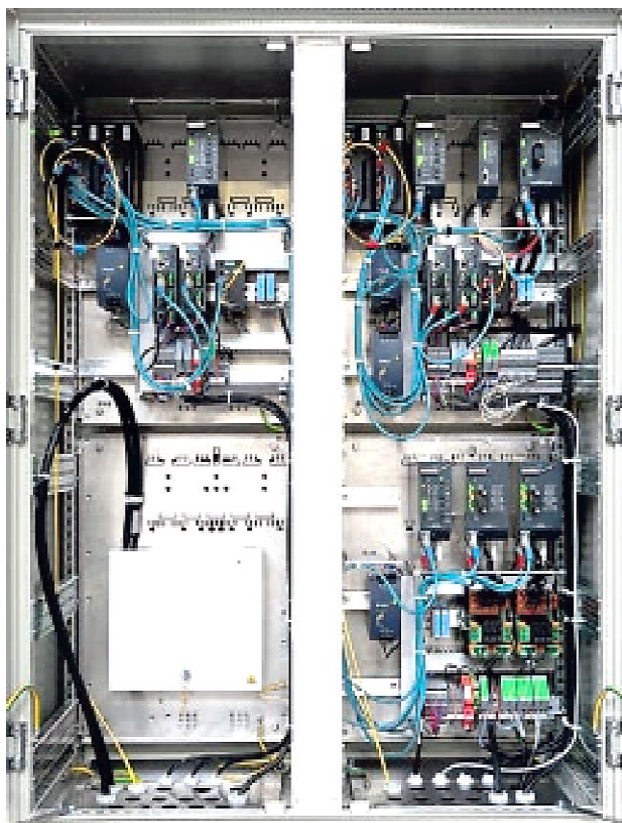


Рис. 3. Путевой шкаф Feak

«Сердцем» проекта DSTW является новая технология «Trackguard Sigrid», которая разделяет процессы передачи информации и энергоснабжения. Впервые станционная система передаёт команды управления на основе IP-адресов на напольные объекты, включая стрелочные переводы и сигналы. Это обеспечивает совершенно новый уровень гибкости при планировании и также позволяет минимизировать затраты на кабельной сети. Питание в систе-

ме реализуется на основе децентрализованной концепции **Trackguard Sigrid**, использующей постоянный ток. Основным элементом системы является **Sigrid Node Device (SND)** – интеллектуальный контроллер, размещенный в непосредственной близости от объектов управления (сигналы, стрелки, счетчики осей). SND преобразует напряжение и обеспечивает локальное распределение энергии [13].

Согласно информации австралийского издания railexpress [14] главным исполнительным директором Siemens Mobility была сформулирована новая концепция «One country, one cloud!», в рамках которой была представлена «Распределенная интеллектуальная система безопасности» (англ. *Distributed Smart Safe System (DS3)*), и развернута на станции Ахау (Австрия) совместно с ÖBB-Infrastruktur AG. По сути DS3 – это метасистема, в которой несколько DSTW работают не как изолированные объекты, а как элементы распределённой сети.

Такой подход позволяет выполнять операции через единый облачный центр и осуществлять анализ данных в реальном времени для прогнозирования неисправностей и предотвращения простоя составов в единой цифровой среде, а не на уровне отдельных станций. Поезда передают данные о своем местоположении по радиосвязи в центральную систему, которая обеспечивает безопасность, переводит стрелки, управляет маршрутами и отправляет разрешения на проследование подвижным единицам. В системе предусмотрено распределение нагрузки критически важных компонентов инфраструктуры среди нескольких центров обработки данных, расположенных в разных географических точках. Расстояния больше не важны, теоретически можно находиться в Германии и управлять цифровой централизацией в Сиднее (Австралия).

Анализ текущей ситуации

В настоящее время российские системы железнодорожной автоматики преимущественно опираются на проприетарные технологические решения. В эксплуатации задействован целый ряд микропроцессорных систем управления, включая:

- МПЦ-И, АБТЦ-И, МАПС-М (НПЦ «Пром-электроника»);
- МПЦ-МЗФ, АБЦМ-Ф, МПАБ-Ф (ЗАО «Форатек АТ»);
- ЭЦ-ЕМ (АО «Радиоавионика»);
- МПЦ-ЭЛ, РПЦ-ЭЛ, АБТЦ-МШ (АО «ЭЛТЕЗА»);
- МПЦ-МПК, ЭЦ-МПК (НИЛ КСА) и др.

Эти системы обеспечивают управление инфраструктурой на ключевых участках сети, однако, их закрытая архитектура ограничивает возможности замены оборудования на аналог другого производителя. Следует отметить, что компания АО «ЭЛ-

ТЕЗА», являющаяся, по сути, дочерним предприятием ОАО «РЖД» – основного владельца российской железнодорожной инфраструктуры, реализует курс на устранение зависимости от проприетарных решений за счёт использования исключительно собственных производственных и технологических ресурсов. Тем не менее, высокая стоимость собственных производственных мощностей, а также значительная протяжённость российской железнодорожной сети обуславливают необходимость рассмотрения альтернативных решений.

Весомую часть затрат при проектировании систем железнодорожной автоматики составляют затраты на сигнально-блокировочный кабель. Релейно-процессорные аналоги (РПЦ-ЭЛ, ЭЦ-МПК, МПЦ-И с релейно-контактным интерфейсом и т.п.) могут подключаться к уже существующей релейной аппаратуре на станции с сохранением старой кабельной сети с меньшими затратами, всё ещё требуя сложной проектной работы и адаптации.

Однако в целом для всех отечественных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) вне зависимости от их вида и производителя характерна древовидная архитектура (рис. 3, а).

От поста электрической централизации через кроссовую на поле прокладываются сигнально-блокировочные кабели, по которым одновременно передается энергия, и выполняется телеизмерение. Ёмкость такого кабеля может быть 30, 60 и 90 медных жил, при помощи разветвительных муфт РМ или напольных кабельных шкафов (ШКН) он распределяется вдоль всей станции в меньшие магистральные кабели или ответвления. Эти ответвления последовательно охватывают несколько светофоров, стрелок, путевых или трансформаторных ящиков. Благодаря использованию стандартных диаметров жил (0,9–1,8 мм) напольные устройства надёжно управляются, но дальность передачи ограничивается падением напряжения и наведёнными токами помех, как правило, до 5 км. В то же время появляются решения, предусматривающие использование оптоволоконных линий. Однако говорить о полноценном переходе к управлению на основе IP-адресации, как в DSTW, пока не приходится.

С другой стороны, в цифровой централизации (DSTW) на поле передача данных и электропитание разделены (рис. 3, б). Объектные контроллеры управляют стрелками и светофорами непосредственно вблизи от них, а не из центрального поста, к которому они подключаются через оптоволоконный кабель, обеспечивающий высокоскоростную передачу данных без существенных ограничений по расстоянию. Электропитание напольных устройств переменным

и постоянным током производится локально кабелями, адаптированными к условиям и требованиям железнодорожной инфраструктуры [12].

Заключение

Западный рынок систем железнодорожной автоматики демонстрирует устойчивую тенденцию к стандартизации и модульности. Что касается отечественных СЖАТ, по мнению авторов, их проприетарная природа сохранится в ближайшие годы. В будущем с учетом политической обстановки возможно формирование аналогичного консорциума в ряде стран СНГ и Азиатско-Тихоокеанского региона, где могут быть разработаны собственные стандарты.

Использование облачных технологий в России в качестве основы для управления движением поездов представляется маловероятным, учитывая значительную протяжённость железнодорожной сети и ограниченные возможности обеспечения устойчивой связи на всем её протяжении. Поэтому говорить о цифровизации СЖАТ по европейскому типу пока рано. Тем не менее, по мнению авторов, существуют отдельные направления, в которых возможно поступательное развитие.

Широкое распространение технологий искусственного интеллекта, вероятно, побудит компании, специализирующиеся на СЖАТ, разрабатывать интеллектуальные функции, не затрагивающие критическую логику обеспечения безопасности движения. Так, отечественный холдинг «Группа компаний 1520» (ГК 1520) представил «Интеллектуальную систему управления перевозками ИСУП» (англ. Traffic Management System (TMS)), функциями которой являются непрерывный мониторинг, предиктивное управление и планирование, прогнозирование развития поездной ситуации, оптимизация перевозок и т.п. [15].

Учитывая ранее обозначенную в статье проблему дефицита квалифицированного персонала, авторы также видят перспективу в разработке интеллектуальной системы поддержки принятия решений для специалистов, непосредственно принимающих участие в обслуживании и диагностике устройств автоматики (диспетчеры, электромеханики). Такая система путем составления прогнозов будет способствовать локализации и устранению отказов в уже существующих и функционирующих СЖАТ [16].

Разработка таких технологий укладывается в общую парадигму глобальной цифровизации производственных процессов, но при этом не требует немедленного перехода к полностью новой цифровой архитектуре, а, скорее, направлена на эволюционное улучшение действующих систем.

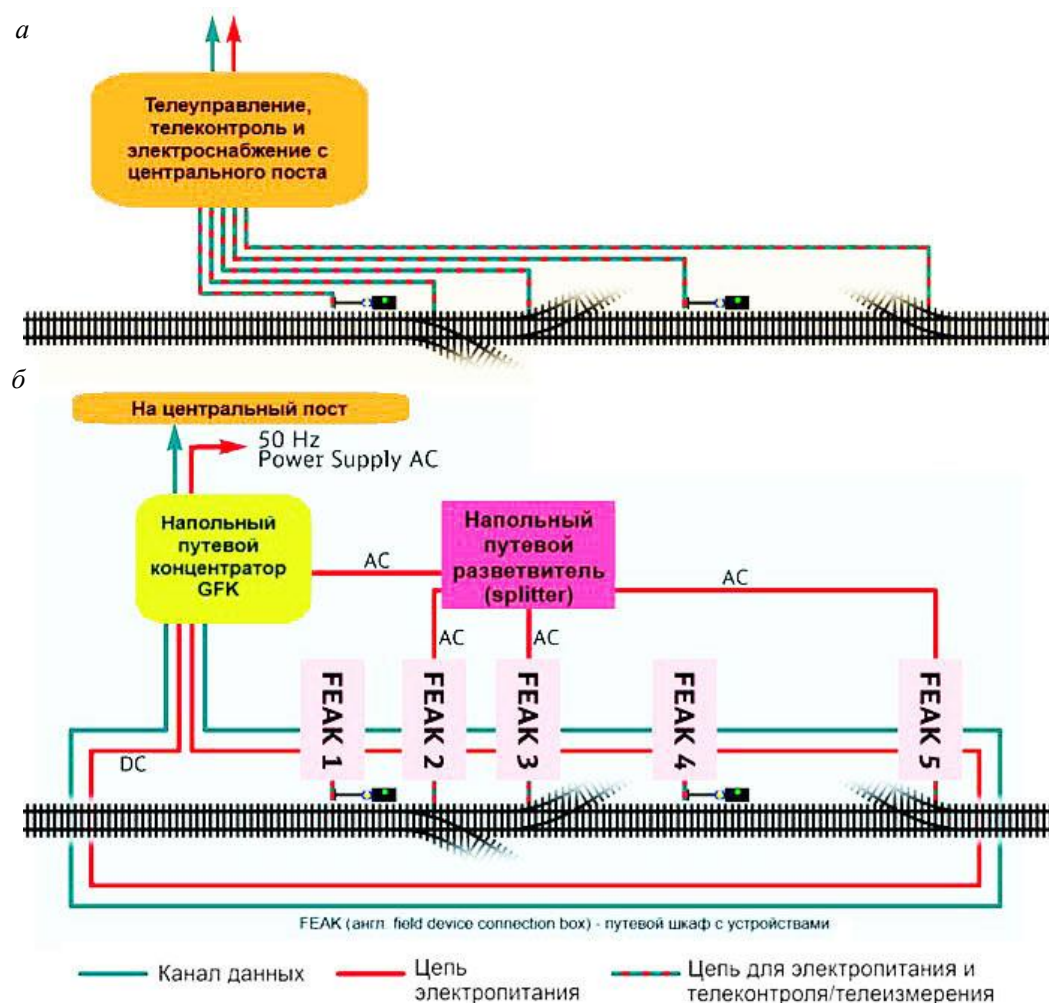


Рис. 3. Схематический план разводки кабельной сети: а – электрическая централизация (релейная, релейно-процессорная, микропроцессорная); б – цифровая централизация (DSTW)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рамочное изобретение: 7 полоса // Гудок. 29.01.2010. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=695573&archive=2010.01.29> (дата обращения: 10.11.2024)
2. Валиев Ш.К., Валиев Р.Ш. Изучение и исследование электрической централизации малых станций : учебно-методическое пособие. Екатеринбург, 2017. 112 с.
3. Ефанов Д.В., Осадчий Г.В. Эволюция систем управления на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 3(76). С. 43–47.
4. Кожевников А.А., Гордиенко Е.П. Вычислительные системы комплексов микропроцессорной централизации // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. Т. 20, № 2(36). С. 32–43.
5. Riesbeck T. Die Zukunft des digitalen Stellwerks // SYSTEM|BAHN. 2023. Март. URL : <https://www.systembahn.net/aktuell/die-zukunft-des-digitalen-stellwerks/> (дата обращения: 23.04.2024).
6. About Us // EULYNX. URL : <https://eulynx.eu/about-us/> (дата обращения: 19.06.2025).
7. EULYNX, shaping the future of railway signalling in Europe : интервью с представителями EULYNX // Fine Engineering Group. 2024. 23 августа. URL : <https://fineeng.eu/eulynx-shaping-the-future-of-railway-signalling-in-europe/> (дата обращения: 18.06.2025).
8. Security Analysis of the RaSTA Safety Protocol / M. Heinrich, J. Vieten, T. Arul, S. Katzenbeisser // 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI). Miami, FL, USA. 2018. Pp. 199–204. doi:10.1109/ISI.2018.8587371
9. Successful implementation of a test system for digital interlockings // Vector. 2023. URL : <https://www.vector.com/int/en/products/industries/railway/user-story-pintsch-successful-implementation-of-a-test-system-for-digital-interlockings/> (дата обращения: 18.05.2025).
10. Ефремов А.Ю. Инновационные технологии ЖАТ в Финляндии // Железные дороги мира. 2023. № 9. С. 48–52. URL : <https://zdmira.com/articles/innovatsionnye-tehnologii-zhat-v-finlyandii> (дата обращения: 18.06.2025).
11. Digital signalling system // Digitale Schiene Deutschland. URL : <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/Digital-signalling-system> (дата обращения: 23.05.2025).

12. Kanis K., Lisker A. Inbetriebnahme des Digitalen Stellwerks Warnemünde // Signal + Draht. 2020. Bd. 112, № 9. S. 6–15. URL : <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9581fd71-61a2-4910-a523-5b7abbae3778/kanis-lisker.pdf> (дата обращения: 13.05.2025).
13. Digital Interlocking Warnemünde // Siemens Mobility. URL : <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/references/digital-interlocking-warnemuende.html> (дата обращения: 16.05.2025).
14. Chan R. Interlocking on to 'one country, one cloud' // Rail Express : австралийское бизнес-издание по железнодорожному транспорту. 2022. 14 Nov. URL : <https://www.railexpress.com.au/interlocking-on-to-one-country-one-cloud/> (дата обращения: 20.05.2025).
15. Интеллектуальная система управления перевозками ИСУП // НПС 1520 Сигнал. URL : https://1520signal.ru/upload/upload_files/prezentaciya-po-isupp-tms.pdf (дата обращения: 21.06.2025).
16. Huang L. The Past, Present and Future of Railway Interlocking System // 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Beijing, China, September 2020. Pp. 170–174. doi:10.1109/ICITE50838.2020.9231438

REFERENCE

1. Ramochnoe izobretenie: 7 polosa [Framework invention: 7th band] // Gudok. 29.01.2010. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=695573&archive=2010.01.29> (data obrashcheniya: 10.11.2024)
2. Valiev Sh.K., Valiev, R. Sh. Izucheniye i issledovaniye elektricheskoy centralizatsii mal'kh stantsiy [Study and research of electric interlocking of small stations] : uchebno-metodicheskoye posobie. Ekaterinburg, 2017. 112 s.
3. Efanov D.V. Evolyutsiya sistem upravleniya na zheleznodorozhnom transporte [Management systems' evolution in railway transport] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2018. № 3(76). S. 43–47.
4. Kozhevnikov A.A., Gordienko E.P. Vychislitel'nye sistemy kompleksov mikroprocessornoy centralizatsii [Computing systems of micro-processor interlocking complexes] // Vestnik GGNTU. Tehnicheskie nauki. 2024. T. 20, № 2(36). S. 32–43.
5. Riesbeck T. Die Zukunft des digitalen Stellwerks // SYS-TEM|BAHN. 2023. Mart. URL : <https://www.system-bahn.net/aktuell/die-zukunft-des-digitalen-stellwerks/> (data obrashcheniya: 23.04.2024).
6. About Us // EULYNX. URL : <https://eulynx.eu/about-us/> (data obrashcheniya: 19.06.2025).
7. EULYNX, shaping the future of railway signalling in Europe : interv'yu s predstavitel'yami EULYNX // Fine Engineering Group. 2024. 23 avgusta. URL : <https://fineeng.eu/eulynx-shaping-the-future-of-railway-signalling-in-europe/> (data obrashcheniya: 18.06.2025).
8. Security Analysis of the RaSTA Safety Protocol / M. Heinrich, J. Vieten, T. Arul, S. Katzenbeisser // 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI). Miami, FL, USA. 2018. P. 199–204. doi:10.1109/ISI.2018.8587371
9. Successful implementation of a test system for digital interlockings // Vector. 2023. URL : <https://www.vector.com/int/en/products/industries/railway/user-story-pintsch-successful-implementation-of-a-test-system-for-digital-interlockings/> (data obrashcheniya: 18.05.2025).
10. Efremov A.Yu. Innovatsionnye tekhnologii ZhAT v Finlyandii [Innovative RAT technologies in Finland] // Zheleznye dorogi mira. 2023. № 9. S. 48–52. URL : <https://zdmira.com/articles/innovatsionnye-tekhnologii-zhat-v-finlyandii> (data obrashcheniya: 18.06.2025).
11. Digital signalling system // Digitale Schiene Deutschland. URL : <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/Digital-signalling-system> (data obrashcheniya: 23.05.2025).
12. Kanis K., Lisker A. Inbetriebnahme des Digitalen Stellwerks Warnemünde // Signal + Draht. 2020. Bd. 112, № 9. S. 6–15. URL : <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9581fd71-61a2-4910-a523-5b7abbae3778/kanis-lisker.pdf> (data obrashcheniya: 13.05.2025).
13. Digital Interlocking Warnemünde // Siemens Mobility. URL : <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/references/digital-interlocking-warnemuende.html> (data obrashcheniya: 16.05.2025).
14. Chan R. Interlocking on to 'one country, one cloud' // Rail Express : avstraliyskoye biznes-izdaniye po zheleznodorozhnomu transportu. 2022. 14 Nov. URL : <https://www.railexpress.com.au/interlocking-on-to-one-country-one-cloud/> (data obrashcheniya: 20.05.2025).
15. Intellektual'naya sistema upravleniya perevozkami ISUP [ISUP intelligent system of traffic management] // NPS 1520 Signal. URL: https://1520signal.ru/upload/upload_files/prezentaciya-po-isupp-tms.pdf (data obrashcheniya: 21.06.2025).
16. Huang L. The Past, Present and Future of Railway Interlocking System / L. Huang // 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Beijing, China, September 2020. P. 170–174. doi:10.1109/ICITE50838.2020.9231438

Информация об авторах

В.А. Канарский – кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь»;

Е.С. Кулалев – старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь».

Information about the authors

V.A. Kanarsky – Candidate of Science (Engineering), Acting Head of the Department of Automation, Telemechanics and Communication;

E.S. Kulalev – Senior Lecturer, Department of Automation, Telemechanics and Communication.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted: 27.06.2025; approved after reviewing: 20.06.2025; accepted for publication: 20.06.2025.

Научная статья
УДК 629.423
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-35-40

МОНИТОРИНГ ИСКРЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО АППАРАТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Волчек Татьяна Витальевна¹, Томилов Вячеслав Станиславович², Волчек Роман Витальевич³

^{1, 2} Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, Красноярск, Россия

³ Институт нефти и газа Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия, romavolchek2004@gmail.com

¹ tanya.vol4eck@yandex.ru

² slavatomilov22@gmail.com

Аннотация. Одним из основных узлов электровоза является тяговый электродвигатель, и, как показывает статистика отказов оборудования электровозов за последние три года, наибольшее количество отказов из всего силового оборудования приходится именно на него. Главной причиной (более 40 %) является переброс электрической дуги по коллектору. Возникновение такого дефекта вызывает простои локомотивов, неплановый ремонт, что наносит значительный ущерб компании ОАО «РЖД». Представлена зависимость тока якоря от величины реактивной ЭДС на примере тягового электродвигателя типа НБ-514Е. Установлено, что при токе выше 1000 А величина некомпенсированной ЭДС может превысить допустимое ее значение. Предлагается разработать интеллектуальный блок, который аналитически с помощью конструктивных данных тягового электродвигателя и данных с микропроцессорной системы управления и диагностики будет определять вспышки под щетками коллектора, а также за счет внедрения в него искусственного интеллекта выявлять предотказное состояние коллекторно-щеточного узла.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, искрение, некомпенсированная ЭДС, межламельное напряжение, искусственный интеллект

Original article

MONITORING OF SPARKING OF THE COLLECTOR-BRUSH APPARATUS OF ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTORS IN OPERATION

Volchek Tatiana V.¹, Tomilov Vyacheslav S.², Volchek Roman V.³

^{1, 2} Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of Irkutsk State University of Railway Engineering, Krasnoyarsk, Russia

³ Institute of Oil and Gas of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, romavolchek2004@gmail.com

¹ tanya.vol4eck@yandex.ru

² slavatomilov22@gmail.com

Abstract. One of the main components of an electric locomotive is the traction electric motor, and as statistics on the failures of electric locomotive equipment over the past three years show, this component accounts for the majority of failures. The main cause (more than 40 %) is the transfer of an electric arc across the commutator. This defect causes downtime for locomotives and unscheduled repairs, that lead to significant losses incurred by the company. In this article, we will explore the relationship between the armature current and the reactive EMF using the example of a NB-514E type traction electric motor. It has been established that at a current above 1000 A, the value of the uncompensated EMF may exceed its permissible value. It is proposed to develop an intelligent unit that will analytically determine flashes under the collector brushes using the design data of the traction electric motor and data from the microprocessor control and diagnostic system. Additionally, owing to incorporation of artificial intelligence, it will identify the pre-failure state of the collector-brush assembly.

Keywords: traction electric motor, sparking, uncompensated EMF, inter-laminar voltage, artificial intelligence

Развитие Восточного полигона остается стратегически важным направлением для ОАО «РЖД», способствующим диверсификации российского экспорта и ускоренному развитию Дальневосточного региона. В настоящее время основной парк грузовых электровозов переменного тока составляет электровоз серии «Ермак» [10]. Данная серия насчитывает более 60 % приписного парка грузовых электровозов Красноярской дирекции тяги. В соответствии со стратегическими отраслевыми

документами к 2035 г. грузооборот должен вырасти на 30 %, в связи с этим увеличивается вес грузовых поездов, а, следовательно, повышается нагрузка на оборудование электровозов, что приводит к преждевременному выходу его из строя.

На рис. 1 представлена диаграмма отказов оборудования электровозов серии «Ермак», по которой видно, что около 27 % всех отказов приходится на силовое оборудование.

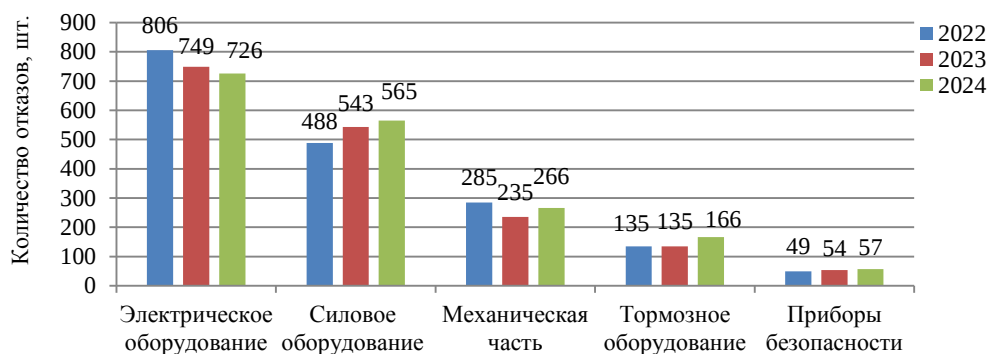


Рис. 1. Статистика отказов оборудования электровозов серии «Ермак» за 2022–2024 г.

На рис. 2 представлена диаграмма отказов элементов силового оборудования электровозов серии «Ермак». Исходя из анализа данных можно видеть, что 50 % отказов приходится на тяговый электродвигатель (ТЭД). По данным КАСАНТ за 2024 г. выявлено, что из всех отказов ТЭД – 188 приходится на отказы коллектора. Это можно объяснить тем, что по условиям коммутационных процессов на коллекторе ТЭД работает в довольно тяжелых

условиях: значительных перегрузок по току, повышения напряжения в контактной сети сверх номинального, значительного повышения скорости вращения в режиме ослабления возбуждения, загрязнения коллектора, толчках напряжения, приложенного к ТЭД и т.д. [1].

Основными причинами отказов ТЭД являются механическое повреждение, переброс электрической дуги и пробой изоляции [9] (рис. 3).

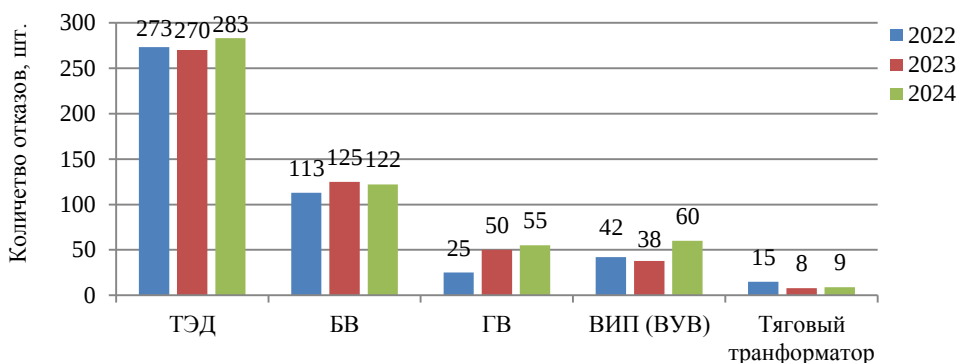


Рис. 2. Статистика элементов отказов ТЭД электровозов серии «Ермак» за 2022–2024 гг.

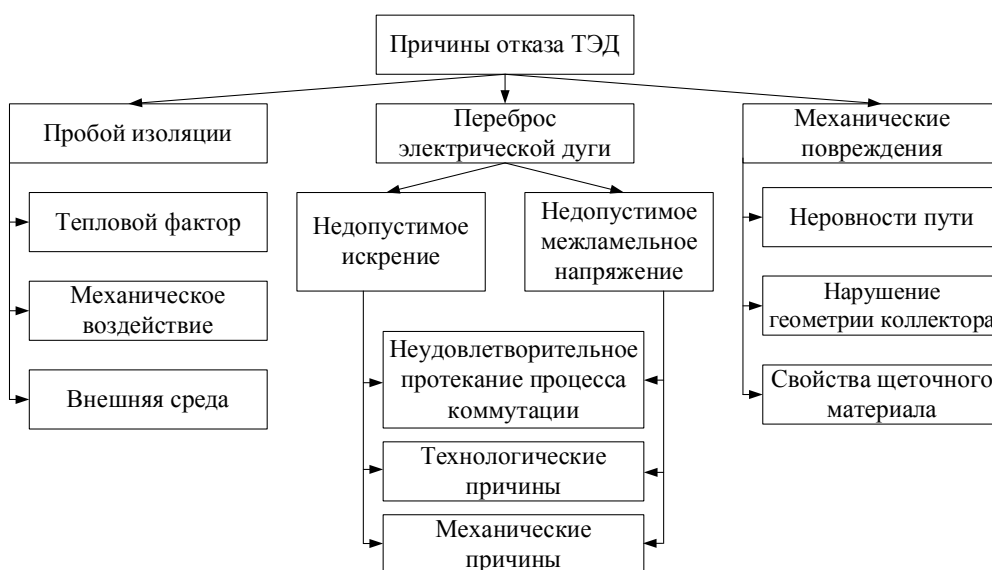


Рис. 3. Причины отказов ТЭД электровозов

Согласно статистическим данным рис. 4, основной причиной отказов ТЭД является переброс электрической дуги по коллектору (более 40 % от общего количества отказов). Такой дефект приводит к его обгару. Устранение последствий данного повреждения требует дорогостоящей процедуры ремонта, включающей полную разборку тягового электродвигателя, замену его деталей и обмотки, что наносит огромный ущерб [2].

Как известно, переброс электрической дуги приводит к круговому огню, который возникает из-за недопустимого межламельного напряжения и возникновения искрения под щетками. Одной из основных причин данных явлений является неудовлетворительное протекание процесса коммутации, что объясняется возникновением недопустимых некомпенсированных ЭДС.

В идеальных условиях реактивная ЭДС должна быть равна компенсированной, которая наводится дополнительными полюсами, т.е. некомпенсированная ЭДС должна быть равной нулю. Но вследствие того, что коммутирующее поле добавочных полюсов имеет разную форму с реактивной ЭДС, а также при возникновении пульсации магнитного потока в ТЭД образуется трансформаторная ЭДС, данное условие не выполняется [3–4].

При быстропротекающем изменении напряжения на ТЭД образуется бросок тока по причине размагничивающего действия вихревых токов. При этом возрастает реактивная ЭДС по сравнению с коммутирующей ЭДС, так как магнитный поток добавочных полюсов отстает по времени и величине от тока, вследствие этого образуется некомпенсированная ЭДС Δe_p , которая вызывает вспышку под щетками [5].

Опытным путем доказано, что в номинальном режиме работы ТЭД имеют допустимое искрение щеток лишь при реактивной ЭДС, равной 3–4 В [5–7].

Рассчитать реактивную ЭДС возможно по формуле А.Б. Иоффе

$$e_r = \frac{8 i_a u_k \omega_c^2 \lambda l_a v_k}{\left(\gamma + u_k + \varepsilon_k - \frac{a}{p} \right) t_k}, \quad (1)$$

где i_a – ток секции, А; ω_c^2 – число витков в секции, шт.; λ – удельная магнитная проводимость потока рассеяния паза, г/м; l_a – длина якоря, м; v_k – окружная скорость коллектора, м/с; γ – коэффициент щеточного перекрытия; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря, мм; p – число пар полюсов, шт.; t_k – коллекторное деление; u_k – число коллекторных пластин на один паз; ε_k – укорочение якорной обмотки в коллекторных делениях.

С использованием конструкционных данных ТЭД типа НБ-514Е электровоза серии «Ермак» [8] получено, что в номинальном режиме реактивная ЭДС равна 3,74 В.

На рис. 5 представлена прямолинейная зависимость тока якоря ТЭД от величины реактивной ЭДС. Согласно экспериментальным исследованиям установлено, что для электрографитовых щеток допустимая Δe_p для обеспечения оптимальной коммутации $\Delta e_p = 0,3–0,6$ В [6]. Если учитывать то, что компенсированная ЭДС при резких бросках тока не успевает скомпенсировать величину реактивной ЭДС из-за демпфирования коммутирующего магнитного потока в массивных участках магнитопровода, то при токе 1150 А некомпенсированная ЭДС может достигнуть уже недопустимой величины, которая приведет к возникновению вспышки под щеткой коллектора.

В настоящее время в процессе эксплуатации возникновения искрения в ТЭД локомотива в пути следования не контролируется. Учеными и специалистами были разработаны способы контроля коммутации в пути следования, но, к сожалению, они не нашли применения на данный момент вследствие того, что все предлагаемые способы осуществлялись на основе включения дополнительных регистрирующих датчиков в конструкцию ТЭД, что усложняет его ремонт [2].

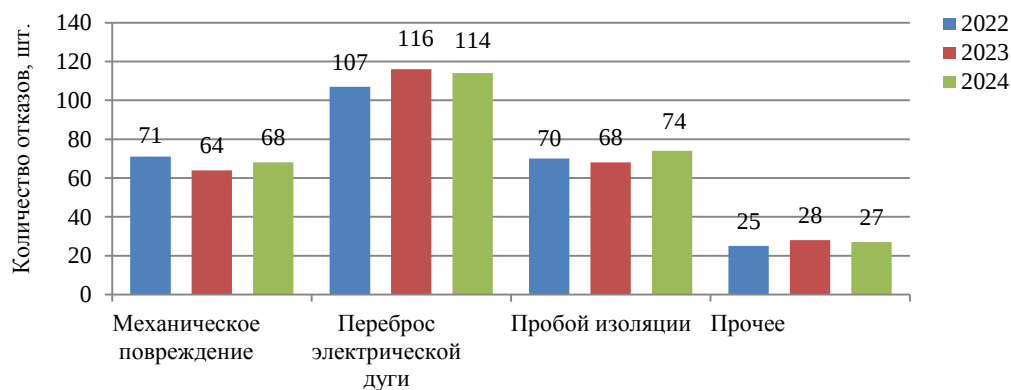


Рис. 4. Статистика причин отказов ТЭД электровозов серии «Ермак» за 2022–2024 гг.

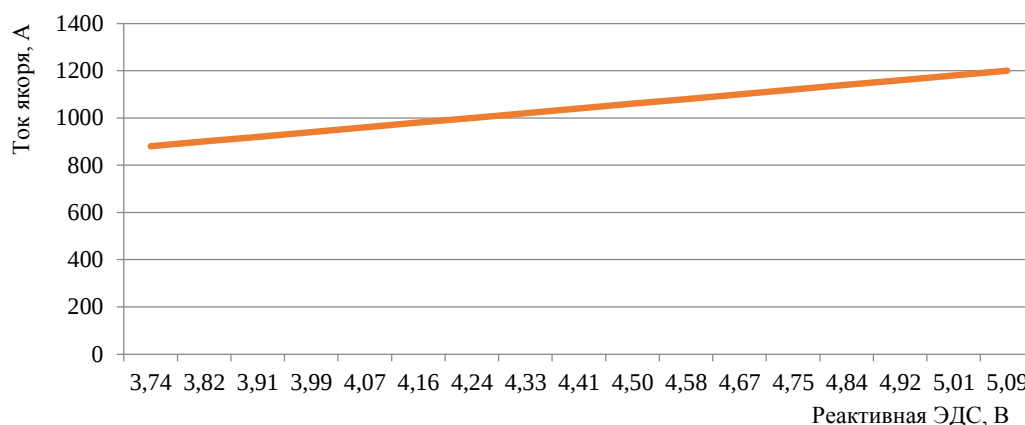


Рис. 5. Зависимость реактивной ЭДС от тока якоря

Таким образом, предлагается разработать интеллектуальный блок, который позволит мониторить процесс коммутации в ТЭД во время эксплуатации без внесения дополнительных изменений в конструкцию ТЭД. С использованием его конструкционных параметров и данных с микропроцессорной системы управления и диагностики возможно аналитически рассчитать величину некомпенсированной ЭДС и сравнить ее с допустимой величиной, что позволит определять возникновения вспышки под щетками коллектора ТЭД.

Для более точного определения искрения ТЭД аналитическим методом необходимо определять сразу несколько параметров, например, кроме некомпенсированной ЭДС, можно определить межламельное напряжение, так как судить о появлении вспышки под щетками коллектора только по величине некомпенсированной ЭДС не рекомендуется [5]. В связи с этим А.С. Курбасовым установлена зависимость межламельного напряжения от величины некомпенсированной ЭДС, при котором отсутствует вспышка под щетками коллектора

$$0,09 \Delta P_k - \frac{\Delta P_k}{e_{max}} \leq 0,5, \quad (2)$$

где e_{max} – межламельное напряжение ТЭД, В; ΔP_k – некомпенсированная часть мощности, определяемая как

$$\Delta P_k = i_a \Delta e_p \gamma. \quad (3)$$

На рис. 6 представлена структурная схема разрабатываемого интеллектуального блока для мониторинга искрения ТЭД. Принцип работы данного блока следующий: на блок сбора и предобработки данных поступают сигналы из МСУД: скорость электровоза v , ток двигателя U_d , ток якоря I_a и ток возбуждения I_b , далее они передаются на блок определения ΔP_k и e_{max} . Затем рассчитанные параметры передаются на блок сравнения, в котором выражение (2) сравнивается с допустимым значением. Следует учитывать, что при проведении опытных испытаний разрабаты-

ваемого блока данное условие может быть скорректировано под определенный тип ТЭД. В зависимости от полученного результата выполнения или невыполнения условия (2) данные передаются в блок определения степени искрения, с которого соответствующая степень искрения (1, 1 ½, 1 ¼, 2, 3) поступает в блок принятия решения (изменить нагрузку или отключить ТЭД).

В связи с развитием цифровых технологий для определения предотказного состояния ТЭД возможно в разрабатываемый блок, а именно блок хранения и обработки данных, внедрить интегрированный искусственный интеллект (ИИ), реализующий предиктивную аналитику и адаптивную диагностику, интегрируя физико-математические модели [формулы (1)–(3)] с машинным обучением. Нейросетевые алгоритмы LSTM, SVM выявляют скрытые нелинейные взаимозависимости между параметрами ТЭД v , U_d , I_a , I_b , e_p , e_{max} , прогнозируют риск недопустимого искрения на основе произошедших отказов и текущих отклонений, динамически корректируют пороговые значения Δe_p и e_{max} с учётом износа оборудования, а также формируют рекомендации по регулировке нагрузки. Это позволяет перейти от устранения последствий отказов к их предупреждению; система заранее выявляет риск возникновения кругового огня и повышает надёжность ТЭД.

Таким образом, проведённый анализ показал, что коллекторно-щеточный аппарат ТЭД является критически уязвимым узлом электровозов серии «Ермак». Более 40 % отказов ТЭД вызваны перебросом электрической дуги из-за недопустимых значений некомпенсированной ЭДС и межламельного напряжения, что приводит к выходу из строя оборудования, простоя электродвижного состава на неплановых видах ремонтов. Установлено, что при токах якоря свыше 1000 А величина Δe_p превышает допустимый порог (0,3–0,6 В), что впоследствии приводит к искрению и круговому огню.

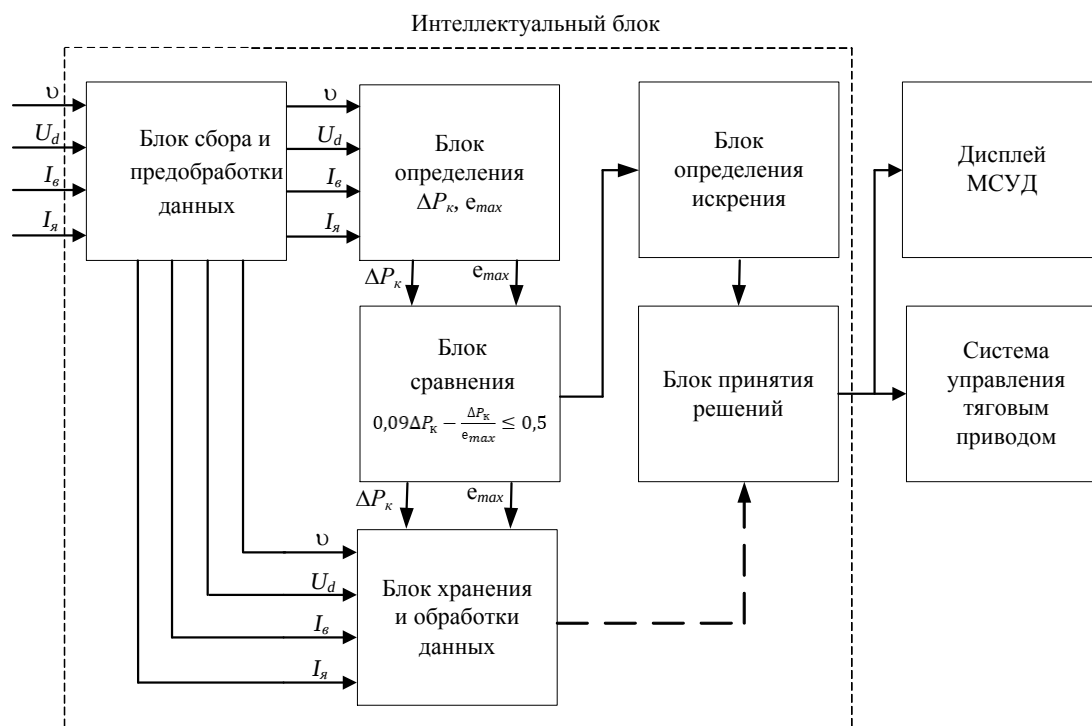


Рис. 6. Структурная схема разрабатываемого интеллектуального блока

Разработанный интеллектуальный блок мониторинга обеспечит переход к заблаговременному предотвращению отказов, вызванных перебросом электрической дуги. Внедрение системы сократит

простои электровозов серии «Ермак» и снизит эксплуатационные затраты ОАО «РЖД» в условиях роста грузооборота Восточного полигона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка способа и устройства для снижения пульсации тока возбуждения тягового электродвигателя электровоза в режиме ослабления поля / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, С. Г. Шрамко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3(63). С. 163–171. doi:10.26731/1813-9108.2019.3(63).163-171
2. Волчек Т.В., Томилов В.С. Анализ способов контроля коммутации коллекторных тяговых электродвигателей электровозов // Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава (ТОиР) : труды II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 27–29 марта 2025 г. Красноярск : Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги, 2025. С. 115–118.
3. Волчек Т.В., Мельниченко О.В., Линьков А.О. Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока // Известия Транссиба. 2019. № 3(39). С. 2–14.
4. Волчек Т.В., Томилов В.С. Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4(96). С. 202–208. doi:10.46973/0201-727X_2024_4_202
5. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. Москва : Транспорт, 1987. 536 с.
6. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. Москва : Госэнергоиздат, 1967. 248 с.
7. Захарченко Д.Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы : учебник для вузов железнодорожного транспорта. Москва : Транспорт, 1979. 303 с.
8. Зарифьян А.А., Мустафин А.Ш. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(83). С. 81–89. doi:10.46973/0201727X_2021_3_81
9. Шкодун П.К. Научные основы диагностирования технического состояния тяговых электродвигателей подвижного состава. Омск : ООО Амфора, 2021. 176 с.
10. Девликамов Р.М., Слепцов М.А. Об оценке коммутационной способности тяговых двигателей грузовых электровозов // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 60–64. doi:10.24160/1993-6982-2020-3-60-64

REFERENCES

1. Pazrabotka sposoba i ustrojstva dlya snizheniya pul'satsii toka vzbuzhdeniya tyagovogo elektrodvigatelya elektrovoza v rezhime oslableniya polya [Development of a method and device for reducing the pulsation of the excitation current of an electric locomotive traction motor in the field attenuation mode] / T.V. Volchek, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov, S.G. Shramko // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2019. № 3(63). S. 163–171. doi: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).163-171.
2. Volchek T.V., Tomilov V.S. Analiz sposobov kontrolya kommutatsii kollektornykh tyagovykh elektrodvigatelykh elektrovozov [Analysis of methods for controlling switching of collector traction electric motors of electric locomotives] // *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont podvizhnogo sostava (TOiR)* : Trudy II Vserossijskoj nauchno-practicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Krasnoyarsk, 27–29 marta 2025 g. Krasnoyarsk : Dorozhny tsentr vnedreniya Krasnoyarskoj zheleznoj dorogi, 2025, S. 115–118.
3. Volchek T.V., Melnichenko O.V., Linkov A.O. Matematicheskoe modelirovanie energoeffektivnoj sistemy oslableniya polya tyagovykh elektricheskikh dvigatelej elektrovozov peremennogo toka [Mathematical modeling of an energy-efficient field attenuation system for traction electric motors of alternating current electric locomotives] // *Izvestiya Transsiba*. 2019. № 3(39). S. 2–14.
4. Volchek T.V., Tomilov V.S. Sovershenstvovanie metodov kontrolya sostoyaniya kollektornogo tyagovogo elektrodvigatelya pri ego ekspluatatsii [Improvement of methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2024. № 4(96). S. 202–208. doi: 10.46973/0201-727X_2024_4_202
5. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. Proektirovanie tyagovykh elektrodvigatelykh [Design of traction electric motors] Moskva : Transport, 1987. 536 s.
6. Ioffe A.B. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]. Moskva : Gosenergoizdat, 1967. 248 s.
7. Zakharchenko D.D. Tyagovye elektricheskie mashiny i transformatory [Traction electric machines and transformers] : uchebnyk dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Moskva : Transport, 1979. 303 s.
8. Zarifyan A.A., Mustafin A.Sh. Izuchenie elektromekhanicheskikh protsessov v kollektornom tyagovom dvigatele s uchedom poter' [The study of electromechanical processes in a collector traction motor, taking into account losses] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2021. № 3(83). S. 81–89. doi: 10.46973/0201727X_2021_3_81
9. Shkodun P.K. Nauchnye osnovy diagnostirovaniya sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelykh podvizhnogo sostava [Scientific foundations of diagnosing the technical condition of traction electric motors of rolling stock]. Omsk : OOO Amfora, 2021. 176 s. ISBN 978-5-6046278-1-5.
10. Devlikamov R.M., Sleptsov M.A. Ob otsenke kommutatsionnoj sposobnosti tyagovykh dvigatelej gruzovykh elektrovozov [On the assessment of the switching capacity of traction engines of freight electric locomotives] // *Vestnik MEI*. 2020, № 3. S. 60–64. doi:10.24160/1993-6982-2020-3-60-64

Информация об авторах

Т.В. Волчек – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог»;
В.С. Томилов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог»;
Р.В. Волчек – студент.

Information about the authors

T.V. Volchek – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Operation;
V.S. Tomilov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Operation;
R.V. Volchek – Student.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 03.09.2025.
The article was submitted: 09.07.2025; approved after reviewing: 03.09.2025; accepted for publication: 03.09.2025.

Научная статья
УДК 629.065
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-41-46

РЕШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОТКАЗОВ СЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ЗА СЧЕТ МИНИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОШИБОК

Кузьмин Олег Сергеевич¹, Луценко Андрей Николаевич²,
Король Роман Григорьевич³, Куликова Елена Сергеевна⁴

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

⁴ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, kulikovaes@mail.ru

¹ readheadunit@mail.ru

² andyhab@mail.ru

³ su@festu.khv.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа факторов, ведущих к отказам сливных систем железнодорожных цистерн в процессе их эксплуатации. Предложено техническое решение, направленное на предотвращение ошибок технологического персонала и позволяющее увеличить эксплуатационный срок оборудования подвижного состава, предназначенного для перевозки жидких грузов. Цель исследования – анализ и разработка решений по минимизации ошибок эксплуатационного характера среди технологического персонала. Актуальность и научная новизна заключаются в обосновании необходимости разработки и внедрения инженерно-технических мероприятий, увеличивающих срок службы сливного оборудования железнодорожных цистерн с учетом влияния человеческого фактора. Практическая значимость настоящей работы заключается в возможности дальнейшего использования предложенных решений в рамках производственных операций, выполняемых с железнодорожными цистернами.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт нефтепродуктов, сливо-наливные операции, задвижка, донный клапан, испарения, экологическая безопасность, подвижной состав, вагоны-цистерны

Original article

SOLVING THE TECHNICAL PROBLEM OF PREVENTING FAILURES OF THE DISCHARGE SYSTEM OF RAILWAY TANK CARS BY MINIMIZING OPERATIONAL ERRORS

Kuzmin Oleg S.¹, Lutsenko Andrey N.², Korol Roman G.³, Kulikova Elena S.⁴

^{1, 2, 3} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

⁴ Pacific National University, Khabarovsk, Russia, kulikovaes@mail.ru

¹ readheadunit@mail.ru

² andyhab@mail.ru

³ su@festu.khv.ru

Abstract. The article presents the results of the analysis of factors leading to failures of the discharge systems of railway tank cars in the process of their operation. A technical solution aimed at preventing errors of the technological personnel and allowing to increase the operational life of the rolling stock equipment intended for liquid cargo transportation is proposed. The aim of the research is to analyze and develop solutions to minimize operational errors among technological personnel. Relevance and scientific novelty lies in the substantiation of the necessity to develop and implement engineering and technical measures that increase the service life of the discharge equipment of railway tank cars, taking into account the influence of the human factor. The practical significance of this work lies in the possibility of further use of the proposed solutions within the framework of production operations performed with railroad tank cars.

Keywords: railway transportation of oil products, draining and filling operations, gate valve, bottom valve, vapors, environmental safety, rolling stock, tank wagons

Введение

В настоящее время железнодорожные вагоны-цистерны являются востребованным и универсальным подвижным составом, применяемым для пере-

возок наливных и сыпучих грузов на территории Российской Федерации, и занимают 12 % от всего парка ОАО «РЖД» [1].

Герметичный цилиндрический резервуар, установленный на раме с колесными парами, прочно вошел в железнодорожную логистику и нашел применение в перевозках нефти, газа, а также иных веществ и материалов, подходящих под критерии перевозок. Побочным эффектом такой востребованности данного элемента транспорта является существенное снижение его эксплуатационного ресурса и, как следствие, возникновение инцидентов, связанных с несанкционированными разливами преимущественно при перевозках нефтепродуктов [2].

Естественные механические, гидромеханические и химические нагрузки, оказываемые на конструктивные элементы цистерны в процессе реализации логистических этапов, ежедневно приводят к постепенному сокращению срока ее службы [3]. Наряду с этим, значительный вклад в износ цистерн вносит и человеческий фактор, выраженный в систематических ошибках персонала в процессе выполнения производственных операций. Очевидно, что полностью обезопасить подвижной состав от естественных источников негативного воздействия, возникающего при перевозке грузов, невозможно.

Поэтому единственный путь к снижению темпов износа цистерн лежит через предотвращение эксплуатационных ошибок.

Основная часть

Единым оператором инфраструктуры сети железных дорог России уделено особое внимание вопросу поддержания железнодорожного подвижного состава, в том числе железнодорожных вагонов-цистерн, в исправном техническом состоянии. Если на первый взгляд это может восприниматься лишь как одно из рядовых эксплуатационных требований, то на самом деле такой подход является основой устойчивого развития транспортных систем, поскольку способствует снижению транзакционных издержек, повышению производительности и надежности грузопотоков, а также обеспечению конкурентоспособности в условиях динамичной изменчивости рынка.

Данный подход реализован как через требования, регламентированные технической документацией, так и через юридический регулятор транспортной отрасли. Основные требования приведены в ГОСТ 10674–2022 «Вагоны-цистерны. Общие технические условия» [4], где прописаны ключевые положения в рамках эксплуатации железнодорожных вагонов-цистерн. Такие обязательства упоминаются и во многих других документах.

К примеру, Регламент взаимодействия ОАО «РЖД» и владельца железнодорожного подвижного состава [5] четко разграничивает договорные отношения и зоны ответственности, указывая на возмещение затрат в случае повреждения вагонов не только за их ремонт, но и за вынужденный простой. Также эколо-

гической стратегией ОАО «РЖД» до 2030 г. и перспективу до 2035 г. [6] предусматривается расширение сотрудничества и развитие диалога с собственниками нетягового подвижного состава с целью обновления парка и использования подвижного состава, не имеющего испарений или утечек при перевозке опасных грузов, в том числе проливов нефтепродуктов на железнодорожное полотно. Однако наиболее частое упоминание о техническом состоянии железнодорожных цистерн присутствует в Правилах перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума [7].

Согласно п. 3.1.1 разд. 3 Правил, перевозка жидких грузов наливом осуществляется только в технически исправных и предназначенных для этих грузов вагонах-цистернах. При этом под исправностью, в том числе, подразумевается удовлетворительное техническое состояние универсального сливного прибора, соответствующее техническим требованиям, а также гарантирующее безопасность перевозки опасного груза и подтвержденное свидетельством, предъявляемым грузоотправителем согласно п. 3.1.3 Правил.

В то же время п. 4.2.12 определено, что котел железнодорожной цистерны должен быть оборудован верхним или нижним сливным устройством, а также необходимой арматурой, обеспечивающей заданную герметичность. При этом исправное техническое состояние может быть обеспечено за счет периодического проведения технического обслуживания технологического оборудования железнодорожных вагонов-цистерн, а также соблюдения требований безопасности к его эксплуатации.

Сама безопасность эксплуатации в рамках погрузочно-разгрузочных работ достигается за счет требований п. 3.7, 3.18 Типовой инструкции по охране труда при сливо-наливных операциях в резервуарных парках, на железнодорожных и автоналивных эстакадах [8], согласно которым сливные приборы железнодорожных цистерн необходимо открывать и закрывать плавно, не допуская ударов и рывков, способных вызвать искрообразование. Из этого следует, что одним из ключевых подходов к обеспечению целостности сливного оборудования железнодорожных цистерн является его грамотная эксплуатация технологическим персоналом, занятым проведением сливо-наливных операций.

В ходе исследования обозначенной проблемы выполнен сбор эмпирических данных о частоте эксплуатационных ошибок среди персонала в рамках производственного процесса выгрузки жидких грузов.

Объектом наблюдения стал участок слива нефтепродуктов. Выбор данного участка обоснован повышенной периодичностью погрузочно-разгрузочных работ, выполняемых с железнодорожными цистернами.

Таблица

**Статистические данные
об эксплуатационных ошибках**

Характер ошибки	Количество ошибок, ед./год	Последствия ошибки, в том числе прогнозируемые
Применение чрезмерных физических усилий при закрытии донного клапана	177	Деформация штанги сливной системы, истирание уплотнения донного клапана
Попытка открытия примерзшего/прикипевшего донного клапана с применением метода увеличения плеча (с изломом торца штанги сливной системы)	47 (2)	Деформация, излом, а также износ торцевых граней штанги сливной системы
Ударные воздействия на крышку сливного прибора и штангу донного клапана	3	Деформация проушин и рукояток стопорных гаек
Неизвещение или несвоевременное извещение ответственных лиц об обнаруженных неисправностях сливной системы на ранних этапах	18	Развитие неисправности до критического состояния, поломки, в том числе неремонтопригодные

Высокая сменяемость подвижного состава подразумевает под собой частое выполнение манипуляций со сливной системой цистерн, а значит, и частое совершение эксплуатационных ошибок, приближающих техническое состояние элементов к критическому значению. Статистика ошибок персонала приведена в таблице.

Исходя из эмпирических данных, наиболее частыми эксплуатационными ошибками являются чрезмерные физические воздействия на сливную систему, приводящие впоследствии к деформации либо отрыву ее конструктивных элементов (рис. 1).

С одной стороны, причиной эксплуатационных ошибок является недостаток опыта и профессиональной подготовки технологического персонала, с другой – ошибки обусловлены переизбытком этого опыта, что вызывает профессиональную деформацию и чрезмерную уверенность. Важно отметить и то, что эксплуатационные ошибки, совершенные на этапе выгрузки или отгрузки, не ограничиваются данными этапами, а лишь откладывают повреждения до очередных этапов, на которых также персоналом будут вынужденно применены идентичные чрезмерные усилия для открытия либо перекрытия донной арматуры.

Можно сделать вывод, что нивелирование негативного влияния человеческого фактора остается одной из самых важных задач в рамках обеспечения целостности сливной системы подвижного состава. По мнению авторов, поставленная задача может быть решена путем предотвращения эксплуатационных ошибок (таблица), выраженных в чрезмерном воздействии на сливную систему при закрытии донного клапана.

Предлагаемое решение может быть достигнуто за счет применения усовершенствованной конструкции ключа задвижки донной железнодорожной цистерны (КЗД) (рис. 2).

Действующие КЗД, применяемые на железнодорожных эстакадах, можно описать как устройства Т-образной формы, образованные цилиндрическим корпусом, в верхнюю часть которого вмонтирована рукоятка, а нижняя часть имеет специализированный переходник под торец штанги сливной системы. Модернизация заключается во встраивании динамометрического ключа в конструкцию КЗД с сохранением его исходной формы.

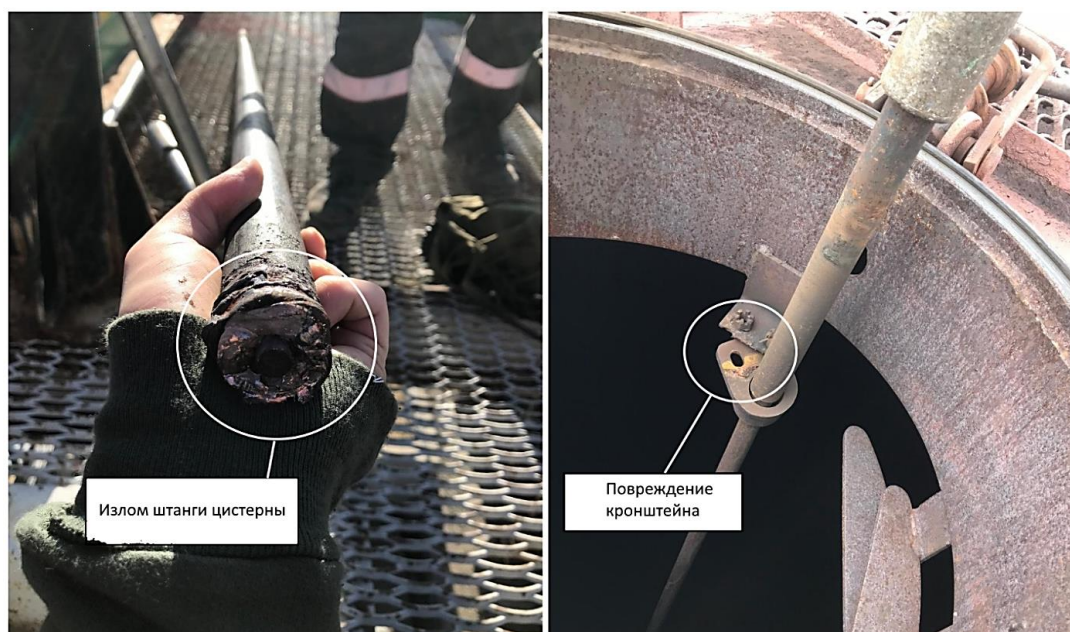


Рис. 1. Примеры повреждений элементов сливной системы железнодорожных цистерн

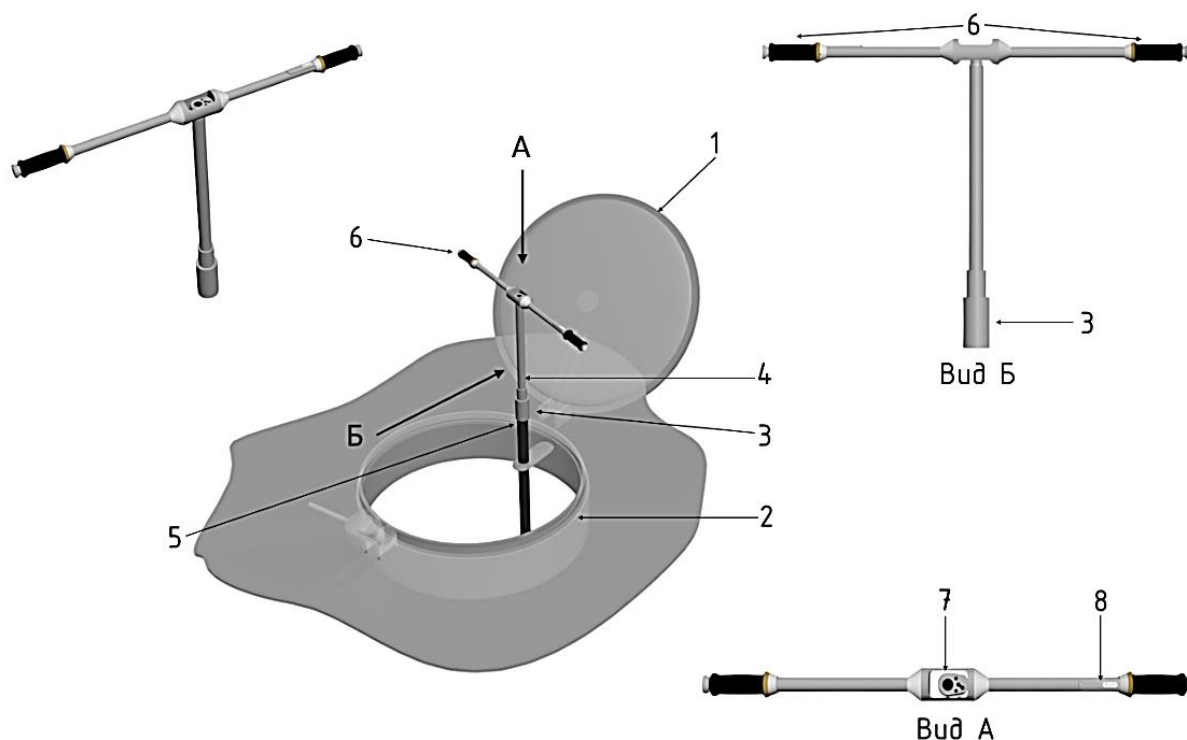


Рис. 2. Динамометрический ключ донной задвижки железнодорожной цистерны

После открытия крышки 1 люка железнодорожной цистерны 2 персоналом производится установка переходника 3 динамометрического КЗД 4 на верхний торец штанги сливного прибора 5 с последующим открытием донной задвижки путем вращения ключа при помощи рукояток 6 и посредством работы храпового механизма ключа 7, рычаг которого заведомо переведен в положение «Против свободного хода».

По окончании опорожнения цистерны производится перекрытие донной задвижки посредством вращения динамометрического ключа в обратном направлении. При этом механизм фиксации значения срабатывания ключа 8 предварительно выставлен на величину затяжки, кН, соответствующую рекомендациям изготовителя донной задвижки. В процессе вращения динамометрического ключа на закрытие донной задвижки оператором контролируется момент усилия по характерному звуку механизма (щелчку), издаваемому при достижении усилия затяжки настроенного момента.

В рекомендательных целях определяют ориентировочное усилие затяжки донного клапана железнодорожной цистерны.

В качестве исходных данных принимаем резьбу штанги М20 с шагом резьбы 1,5 и классом прочности 8,8.

Для расчета усилия момента затяжки используем формулу

$$T = K d F, \quad (1)$$

где K – коэффициент трения, равный 0,15; d – номинальный диаметр резьбы; T – момент затяжки, рекомендуемый заводами изготовителями, равный 200 Н·м.

Выразим усилие затяжки F через формулу

$$F = \frac{T}{K d} = 66,7 \text{ кН}. \quad (2)$$

На основании полученных результатов, рекомендуемое усилие затяжки для донного клапана с применением модернизированного динамометрического ключа составляет около 67 кН. Важно обратить внимание, что данное значение может меняться в зависимости от материала, из которого изготовлены элементы сливной системы. Поэтому для более предметного подхода перед настройкой динамометрического ключа на значение усилия затяжки будет правильнее свериться с рекомендациями заводов-изготовителей.

Преимущество заявляемого технического решения – обеспечение точности при закрытии донной задвижки железнодорожной цистерны. За счет этого существенно минимизируется риск возникновения неисправностей сливной системы, вызванных неверными действиями со стороны эксплуатационного персонала и обусловленных чрезмерными физическими усилиями при закрытии арматуры.

РЕШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОТКАЗОВ СЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ЗА СЧЕТ МИНИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОШИБОК

Заключение

Статья посвящена актуальной проблеме предотвращения отказов сливных систем железнодорожных цистерн, вызванных эксплуатационными ошибками персонала.

Проведен детальный анализ факторов, способствующих износу оборудования, и предложено инновационное техническое решение для минимизации человеческого фактора.

На основе эмпирических данных выделены наиболее распространенные ошибки, включая применение избыточного усилия при закрытии клапанов, попытки открытия примерзших элементов ударными методами и несвоевременное сообщение о неисправностях, значительно сокращающие срок службы оборудования.

В качестве решения разработан модернизированный динамометрический ключ для задвижки донной цистерны. Этот инструмент позволяет точно контро-

лировать усилие затяжки (рекомендуемое значение – 67 кН), предотвращая повреждения сливной системы. Ключ оснащен механизмом фиксации и звуковым сигналом, что делает его удобным для использования персоналом. Внедрение такого решения позволит существенно снизить количество эксплуатационных ошибок, увеличить срок службы сливного оборудования, а также минимизировать риски аварийных разливов нефтепродуктов, что особенно важно с точки зрения экологической и промышленной безопасности. При этом важно подчеркнуть необходимость учета рекомендаций производителей оборудования при настройке динамометрического ключа, а также возможность адаптации решения для различных типов цистерн и грузов.

Предложенное техническое решение не только повышает надежность сливных систем, но и способствует снижению экологических и экономических рисков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Российские железные дороги : офиц. сайт. URL : <https://company.rzd.ru/> (дата обращения: 25.04.2025).
2. Сапетов М.В. Доклад на заседании Комитета по грузовому подвижному составу НП ОПЖТ от 24.06.2022 г. URL : <http://moykoleya1520.rf/new/8300> (дата обращения: 20.04.2025).
3. Современные подходы к донной арматуре слива железнодорожных цистерн / С.Л. Горобченко, Д.А. Ковалев, А.В. Теппоев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 396–405.
4. ГОСТ 10674–2022. Вагоны-цистерны. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт: утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2022 г. № 1616-ст : введен 20204-06-01.
5. Регламент взаимодействия ОАО «РЖД», владельцев (операторов) вагонов и владельцев, пользователей железнодорожных путей необщего пользования при оказании ОАО «РЖД» услуги отстоя порожних вагонов, не принадлежащих ОАО «РЖД», на железнодорожных путях необщего пользования. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=1761> (дата обращения: 03.05.2025).
6. Экологическая стратегия ОАО «РЖД» до 2030 г. и перспективу до 2035 г. : [утв. решением совета директоров ОАО «РЖД» от 21.03.2025 г. (протокол № 11)]. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=2008> (дата обращения 27.04.2025).
7. Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозок нефтебитума : приказ Министерства транспорта РФ от 29 июля 2019 г. № 245 (зарегистрирован 07.02.2020 г. № 57458).
8. ТОИ Р-112-13-95. Типовая инструкция по охране труда при сливноналивными операциях в резервуарных парках, на железнодорожных и автоналивных эстакадах.

REFERENS

1. Rossijskie zheleznye dorogi : ofitsial'ny sait [Russian Railways: official website]. URL : <https://company.rzd.ru/> (data obrashcheniya: 25.04.2025).
2. Sapetov M.V. Doklad na zasedanii Komiteta po gruzovomu podvizhnomu sostavu [Report at the meeting of the Committee for Freight Rolling Stock of NP OPZhT dated 24.06.2022]. URL : <http://moykoleya1520.rf/new/8300> (data obrashcheniya: 20.04.2025).
3. Sovremennye podkhody k donnoy armature sliva zheleznodorozhnykh tsistern [Modern approaches to the bottom armature of the railroad tank cars drain] / S.L. Gorobchenko, D.A. Kovalev, A.V. Tepoev [et al.] // Izvestia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2024. № 5. S. 396–405.
4. GOST 10674-2022. Vagony-tsisterny. Obshchie tehnikheskie usloviya [GOST 10674-2022. Tank wagons. General technical conditions]. Mezhgosudarstvenny standart: utv. i vved. v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 27 dekabrya 2022 g. № 1616-st : vveden 20204-06-01.
5. Reglament vzaimodejstviya ОАО «RZhD», vladel'tsev (operatorov) vagonov i vladel'tsev, pol'zovatelej zheleznodorozhnykh putej neobshchego pol'zovaniya pri okazanii ОАО «RZhD» uslugi otstoya porozhnykh vagonov, ne prinadlezhashchikh ОАО «RZhD», na zheleznodorozhnykh putyakh neobshchego pol'zovaniya [Regulations on the interaction between JSCo «Russian Railways», owners (operators) of railcars and owners, users of non-revenue railroad tracks when JSCo «Russian Railways» provides services of idling empty railcars not owned by JSCo «Russian Railways» on non-revenue railroad tracks]. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=1761> (data obrashcheniya: 03.05.2025).

SOLVING THE TECHNICAL PROBLEM OF PREVENTING FAILURES OF THE DISCHARGE SYSTEM OF RAILWAY TANK CARS BY MINIMIZING OPERATIONAL ERRORS

6. Ekologicheskaya strategiya OAO "RZhD" do 2030 g. i perspektivu do 2035 g. [Environmental Strategy of JSCo «Russian Railways» until 2030 and in the future until 2035] : utv.resheniem soveta direktorov OAO "RZhD" ot 21.03.2025 g. (protokol № 11). URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=2008> (data obrashcheniya: 27.04.2025).

7. Ob uverzhdenii Pravil perevozok zheleznodorozhnym transportom грузов nalivom v vagonakh-tsisternakh i vagonakh bunkernogo tipa dlya perevozki neftebituma [On Approval of the Rules for the Carriage by Rail of Cargoes in Bulk in Tank Wagons and Bunker Wagons for the Carriage of Oil Bitumen] : Prikaz Ministerstva Trnsporta RF ot 29 iyulya 2019 g. № 245 (zaregistrovan 07.02.2020 g. № 57458).

8. TOI R-112-13-95. Tipovaya instruktsiya po okhrane truda pri slivonalivnykh operatsiyakh v rezervuarnykh parkakh, na zheleznodorozhnykh i avtonalivnykh estakadakh [TOI R-112-13-95. Standard labor protection instruction for loading and unloading operations in tank farms, on railroad and truck loading racks].

Информация об авторах

О.С. Кузьмин – аспирант кафедры «Техносферная безопасность»;

А.Н. Луценко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность»;

Р.Г. Король – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика»;

Е.С. Куликова – старший преподаватель Высшей школы «Транспортного строительства, землеустройства и геодезии».

Information about the authors

O.S. Kuzmin – Post-graduate Student, Department of Technosphere Safety;

A.N. Lutsenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Technosphere Safety;

R.G. Korol – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Transport Processes Technology and Logistics;

E.S. Kulikova – Senior Lecturer, the Higher School of Transport Construction, Land Management and Geodesy.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 28.05.2025; принята к публикации 28.05.2025.

The article was submitted: 15.05.2025; approved after reviewing: 28.05.2025; accepted for publication: 28.05.2025.

Научная статья
УДК 681.586.57
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-47-53

ПОРТАТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Лосев Дмитрий Сергеевич¹, Гуляев Александр Викторович²

¹ АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод», Хабаровск, Россия, losevd2000@yandex.ru

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, 89143127984@ya.ru

Аннотация. Рассмотрена необходимость поверки датчиков температуры, являющихся частями аналитического лабораторного оборудования. Данная необходимость обоснована указаниями, представленными в руководствах по эксплуатации соответствующих приборов. Для проведения поверки датчика температуры нужно использовать специализированное оборудование. Рыночные варианты такого оборудования дорогостоящи, поэтому резонен поиск альтернативы, в качестве которой предлагается портативное устройство, состоящее из измерителя-регулятора «ТРМ10», поверенного датчика температуры Pt100 и нагревателя, набранного из нихромовых резисторов. Приведено описание процесса изготовления этого устройства и обоснование соответствия его параметров поставленной задаче. Функции портативного устройства: нагрев среды, в которой располагаются поверяемый и поверенный датчики температуры до заданных значений; отображение показаний поверенного датчика для оценки их сходимости с показаниями поверяемого датчика. Ввиду того, что устройство является портативным и малогабаритным, оно пригодно для эксплуатации в условиях испытательной лаборатории. Использование устройства позволяет выполнять ряд мероприятий технического обслуживания, обозначенных в руководствах по эксплуатации аналитического оборудования. Выполнение данных мероприятий важно для контроля состояния датчиков температуры, являющихся ключевыми узлами многих приборов. Это вносит существенный вклад в обеспечение надежной работы аналитического оборудования, без которой невозможен качественный контроль важнейших параметров сырья и продуктов, испытываемых на нем.

Ключевые слова: датчик температуры, измеритель, регулятор, нагреватель, термостат, калибровка, оценка работоспособности

Original article

PORTABLE DEVICE FOR RAPID ASSESSMENT OF TEMPERATURE SENSORS PERFORMANCE

Losev Dmitriy S.¹, Gulyaev Alexander V.²

¹ JSC NNK-Khabarovsk oil refinery, Khabarovsk, Russia, losevd2000@yandex.ru

² Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, 89143127984@ya.ru

Abstract. This article discusses the necessity of verifying temperature sensors, which are components of analytical laboratory equipment. This necessity is justified by the instructions provided in the operational manuals of the respective instruments. To verify a temperature sensor, specialized equipment is required. Market options for such equipment are costly, making it reasonable to seek alternatives. In this article, a portable device is proposed as an alternative, consisting of a «TRM10» temperature controller, a certified Pt100 temperature sensor, and a heater assembled from nichrome resistors. The article provides a description of the portable device manufacturing process and justification for the compliance of its parameters with the assigned task. The functions of the portable device include heating the medium in which a temperature sensor being tested and a certified one are placed to specified values and displaying the readings of the certified sensor to assess their convergence with the readings of the sensor being tested. Since the device is portable and small-sized, it is suitable for use in a test laboratory. The use of the device allows for the execution of a series of maintenance activities outlined in the operational manuals of analytical equipment. Performing these activities is important for monitoring the condition of temperature sensors, which are key components of many instruments. This significantly contributes to ensuring the reliable operation of analytical equipment, which is essential for the quality control of critical parameters of raw materials and products tested on it.

Keywords: temperature sensor, measuring device, controller, heater, thermostat, calibration, performance evaluation

Нефть представляет собой сложную смесь углеводородов различной молекулярной массы и других химических соединений. Переработка нефти является многоступенчатым процессом, который необходимо непрерывно регулировать. Получившийся в результате данного процесса продукт должен соответствовать жестким требованиям стандартов.

Для обеспечения данного соответствия осуществляется тщательный контроль параметров сырья и продуктов на каждой из стадий нефтепереработки. На АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод» контроль параметров реализуется во многом силами испытательной лаборатории.

Для выполнения задачи контроля в испытательной лаборатории применяется широкое разнообразие аналитического оборудования. Многие приборы из этого разнообразия оснащены датчиками температуры. Часто датчик температуры – ключевой узел прибора, это обосновывается тем, что при различных исследованиях нефтяного сырья и продуктов значение температуры является отражением важнейших параметров.

В частности, измерение температуры имеет ключевое значение при исследовании фракционного состава нефтепродуктов. Фракционный состав является определяющей характеристикой при установлении области применения нефтепродуктов. Пределы гарантируют качество продуктов с соответствующими характеристиками испаряемости [1].

В испытательной лаборатории для определения фракционного состава нефтепродуктов используются различные автоматические аппараты, такие как «OptiDist» фирмы «Herzog by PAC», «DIST-A1» компании «TECHNO». Также применяются аппараты «ручной» разгонки нефтепродуктов, такие как «АРН-ЛАБ-03» АО «ЛОИП».

Работа любого из обозначенных приборов заключается в постепенном нагреве нефтепродукта и отслеживании температуры его паров [2] с помощью ртутного термометра в случае «АРН-ЛАБ-03» или термометра сопротивления в случае автоматических аппаратов. Также измерение температуры имеет ключевое значение при определении температуры вспышки – наименьшей температуры конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

Вспышка – быстрое сгорание газопаровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, сопровождающееся кратковременным видимым свечением. Значение температуры вспышки следует применять для характеристики пожарной опасности жидкости, включая эти данные в стандарты и технические условия на вещества; при определении категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности в соответствии с требованиями норм технологического проектирования, при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности и взрывобезопасности в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010. Допускается использовать экспериментальные и расчетные значения температуры вспышки [3].

Кроме того, при исследовании свойств масла значение температуры вспышки можно использовать как характеристику содержания в масле легкокипящих фракций, наличие которых влияет на его испаряемость в процессе эксплуатации. В том случае, если содержащиеся в масле маловязкие фрак-

ции являются легкокипящими и быстро испаряются, расход масла становится повышенным, и снижаются его низкотемпературные свойства.

Сущность экспериментального метода определения температуры вспышки заключается в нагревании определенной массы вещества с заданной скоростью, периодическом зажигании выделяющихся паров и установлении факта наличия или отсутствия вспышки при фиксируемой температуре. Температура фиксируется посредством датчика температуры.

В испытательной лаборатории ХНПЗ применяются различные приборы для определения температуры вспышки, в том числе автоматические аппараты для определения температуры вспышки в закрытом тигле по методу Пенски–Мартенса «FP93 5G2» и в открытом тигле по методу Кливленда «FP92 5G2» компании «ISL by PAC», автоматический анализатор температуры вспышки в закрытом тигле «РМА-А1» компании «TECHNO» и др.

Кроме анализаторов температуры вспышки и аппаратов для определения фракционного состава нефти и нефтепродуктов, датчики температуры применяются во многом другом оборудовании испытательной лаборатории, например, в анализаторах смазывающей способности нефтепродуктов, в анализаторах предельной температуры фильтруемости и в анализаторах давления насыщенных паров.

При эксплуатации оборудования, оснащенного датчиками температуры, нередко возникает ситуация, когда два однотипных прибора при исследовании одного продукта выдают значительно различающиеся результаты. Также бывают случаи, при которых фактические результаты анализов существенно отдалены от предполагаемых. Это является поводом для диагностики вызывающего сомнения прибора, при которой необходимо оценить работоспособность каждого узла, в том числе узлов измерения температуры.

Также при эксплуатации некоторых моделей необходимо периодически проводить калибровку входящих в их комплект датчиков температуры. Это четко обозначено в руководствах по эксплуатации.

В частности, в руководстве по эксплуатации анализатора для определения фракционного состава нефти и нефтепродуктов «DIST-A1» [4] обозначено, что раз в полгода следует проводить проверки и калибровки датчиков температуры конденсера, приемной камеры, нагревателя, датчика температуры образца. Также отмечено, что датчик температуры образца необходимо проверять на соответствие его показаний показаниям эталонного термометра не реже раза в шесть месяцев.

В руководстве по эксплуатации автоматического анализатора температуры вспышки в закрытом тигле «РМА-А1» обозначено [5], что не реже раза в полгода необходимо проводить динамическую калибровку датчика температуры образца по эталонному термометру.

В инструкции по эксплуатации системы «OptiDist» указано [6], что не реже раза в год должна проводиться калибровка измерительной системы и ее элементов, в том числе датчика температуры паров. Калибровка датчика температуры пара представляет из себя заполнение таблицы коррекции показаний датчика температуры в соответствии с показаниями эталонного датчика, находящегося в той же среде, что и проверяемый. При этом среду нужно термостатировать на нескольких температурных точках (до 10).

Для «FP93 5G2» [7] также присутствует возможность корректировать показания датчика температуры образца в соответствии с показаниями эталона на нескольких температурных точках.

Для анализатора температуры вспышки «HFR 339» [8] имеется возможность корректировки показаний датчика температуры образца по показаниям эталонного термометра.

Для аппарата возвратно-поступательного движения с трением шарика по пластинке «HFRR II» (используется для определения смазывающей способности образца) также предусмотрена калибровка основного температурного датчика сопротивления ТДС. В соответствии с руководством по эксплуатации, «для калибровки ТДС нужно держать при двух известных стабильных температурах (например, с помощью водной бани с термостатическим контролем и справочного термометра)».

В общем случае калибровка, или поверка датчика температуры, представляет из себя оценку соответствия его показаний показаниям эталонного датчика, находящегося в той же среде, что и проверяемый датчик. При этом температура в среде должна термостатироваться на нескольких выбираемых значениях (рис. 1). Подобная процедура под названием «Сличение с эталонным (образцовым) термометром в жидкостном термостате» также описана в ГОСТ 8.461-2009 «Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки» [9].

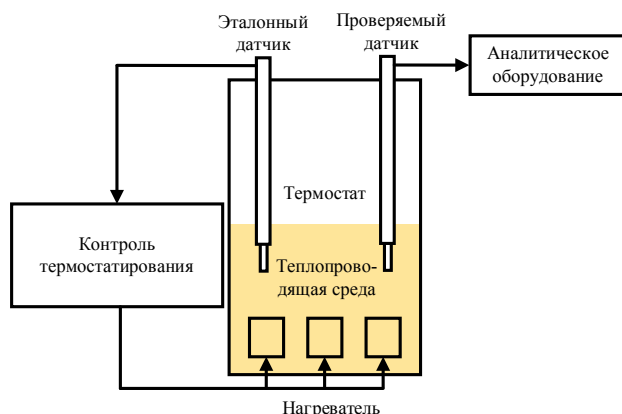


Рис. 1. Схема поверки датчика температуры

Стоит отметить, что при проведении описанной процедуры в соответствии с обозначенными выше руководствами по эксплуатации датчик температуры должен оставаться подключенным к аналитическому оборудованию, частью которого он является. Большинство моделей аналитического оборудования обладают большими габаритами, и транспортировать их куда-либо крайне затруднительно. Следовательно, поверку датчиков температуры нужно проводить по месту эксплуатации аналитического оборудования, в условиях испытательной лаборатории. Свободное пространство здесь является ограниченным, поэтому приспособление для проведения поверки датчиков температуры должно быть компактным и портативным.

Представленные на рынке приспособления, подходящие для поверки датчиков температуры в обозначенных условиях, являются дорогостоящими. Например, стоимость ручного сухоблочного калибратора Fluke 9100S составляет более двухсот тысяч рублей. Поэтому резонным является поиск альтернативного решения задачи поверки датчиков температуры.

При поиске такого решения был найден патент [10] на полезную модель «Устройство поверки выходных параметров датчиков реле температуры с парожидкостным наполнителем». Основными компонентами данной разработки являются холодильная ванна с фиксированной температурой и термоэлемент для контроля этой температуры. Основные компоненты функционально схожи с представленными на рис. 1, но в целом описанная в [10] полезная модель применима именно при поверке выходных параметров датчиков-реле температуры для холодильной техники, чувствительным элементом которых является термосистема с парожидкостным наполнителем, в основном работающая в диапазоне минусовых температур. Датчики температуры перечисленных выше моделей оборудования работают в диапазоне положительных температур и не являются частями холодильной техники, поэтому представленная в патенте модель в условиях испытательной лаборатории неприменима. Иных публикаций, в которых были бы описаны альтернативные решения поверки датчиков температуры, найдено не было. Это является обоснованием оригинальности разработки, описанной в данной статье.

Устройство для поверки датчиков температуры, предлагаемое в данной статье, изображено на рис. 2. Основные элементы устройства:

- 1) ёмкость с нагревателем, заполненная силиконовым маслом;
- 2) блок питания 12 В для обеспечения нагревателя энергией;

3) измеритель-регулятор «ТРМ10» [11] с датчиком температуры Pt100 для обеспечения термостатического контроля и отображения показаний поверенного в метрологической лаборатории Pt100.

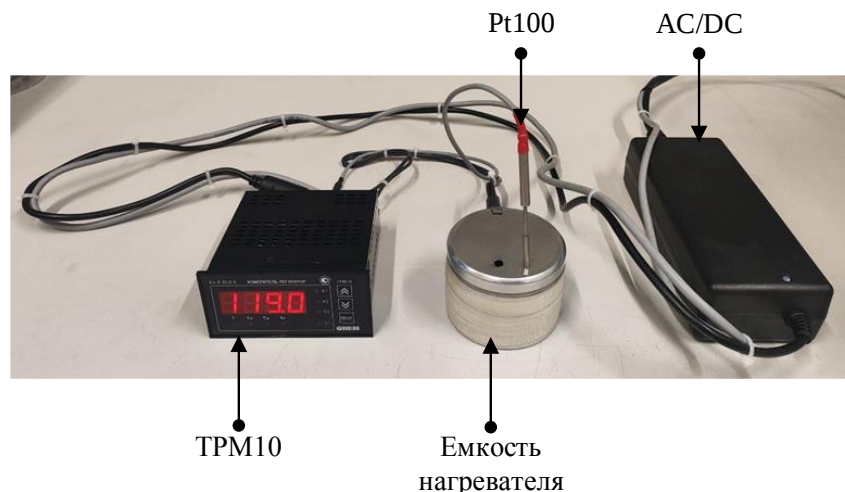


Рис. 2. Устройство для проверки датчиков температуры

Основной функцией предлагаемого устройства является поддержание заданной температуры, поэтому его также можно называть термостатом. В качестве нагревательного элемента термостата использованы нихромовые нагреватели от списанных генераторов водорода. Для определения схемы их соединения была рассчитана мощность, необходимая для достаточно быстрого нагрева термостатируемой емкости. Расчет мощности приведен ниже.

В приведенных выше моделях аналитического оборудования в качестве датчиков температуры используются платиновые термометры сопротивления. Как известно [12], данный вид первичных преобразователей температуры отличается практически линейной характеристикой. Соответственно, для оперативной оценки правильности показаний таких термометров достаточно проверить их на нескольких температурных точках. Необязательно, чтобы эти точки являлись границами диапазона измеряемых температур. Исходя из этого положения, в качестве рабочих температур термостата выбран диапазон от комнатной температуры (около 20 °С) до 150 °С.

Емкость термостата заполнена силиконовым маслом для лучшей теплопередачи. Объем масла ПМС 20 [13] в термостате – около 150 мл. Для определения требуемой мощности нагревателя найдем количество энергии, которое нужно передать ста пятидесяти миллилитрам масла для нагрева их от 20 до 100 °С. Точка 100 °С выбрана, так как находится в средней части диапазона рабочих температур термостата и может использоваться как промежуточная при проверке датчиков.

Удельная теплоемкость ПМС 20 приблизительно равна:

$$c = 1,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Плотность ПМС 20:

$$\rho = 0,95 \frac{\text{кг}}{\text{дц}^3}.$$

Тогда масса масла термостата:

$$m = \rho V; \quad (1)$$

$$m = 0,95 \cdot 0,15 = 0,143 \text{ кг}. \quad (2)$$

Для нагрева 0,143 кг масла на 80 °С необходимо такое количество энергии:

$$Q = c m \Delta t; \quad (3)$$

$$Q = 1,1 \cdot 0,143 \cdot 80 = 12,54 \text{ кДж}. \quad (4)$$

Для определения мощности нагрева нужно выбрать длительность временного промежутка, в течение которого рассчитанное количество энергии должно быть передано термостату. При выборе этого временного промежутка будем руководствоваться следующими положениями. Термостат должен нагреваться достаточно быстро, чтобы процесс проверки датчика температуры был оперативен и простой аналитического оборудования минимален. При этом нагрев термостата должен осуществляться равномерно, чтобы локального перегрева масла не наблюдалось, и его температура была приблизительно одинакова во всей емкости термостата. В ходе опытной эксплуатации описанного в данной работе термостата было выявлено, что компромисс между приведенными положениями достигается при нагреве термостата от 20 до 100 °С за пять минут. Поэтому примем, что нагрев осуществляется в течение пяти минут. Тогда мощность нагрева:

$$P = \frac{Q}{t}; \quad (5)$$

$$P_{расч} = \frac{12,54 \cdot 10^3}{300} = 41,8 \text{ Вт}. \quad (6)$$

Если нагрев осуществляется от источника постоянного напряжения 12 В, то сила тока, проходящего через нагреватель при рассчитанной мощности,

$$I = \frac{P_{расч}}{U}; \quad (7)$$

$$I_{расч} = \frac{41,8}{12} = 3,48 \text{ А.} \quad (8)$$

Суммарное значение сопротивления нагревателя:

$$R_{\Sigma расч} = \frac{U}{I_{расч}}; \quad (9)$$

$$R_{\Sigma расч} = \frac{12}{3,48} = 3,45 \text{ Ом.} \quad (10)$$

Максимальная мощность, которую может рассеять один нихромовый нагреватель: $P_1 = 8 \text{ Вт}$, а его сопротивление: $R = 2,2 \text{ Ом}$. При таких параметрах ток через каждый нихромовый нагреватель не должен превышать:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_1}{R}}; \quad (11)$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{8}{2,2}} = 1,91 \text{ А.} \quad (12)$$

При последовательном соединении нихромовых нагревателей одновременное соответствие реальных параметров схемы рассчитанным $R_{\Sigma расч}$, $I_{\max}$, $I_{расч}$ не обеспечивается. Поэтому нагревательные элементы были соединены последовательно параллельно (рис. 3).

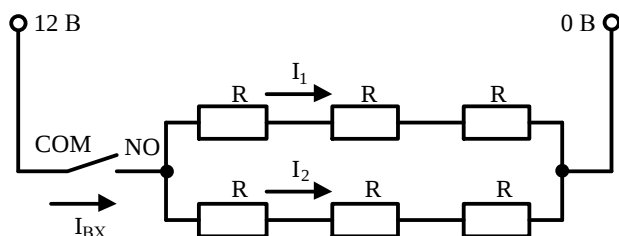


Рис. 3. Схема соединения нагревателей: COM – общий контакт ТРМ10; NO – нормально открытый контакт ТРМ10

При таком соединении суммарное сопротивление нагревателя

$$R_{\Sigma} = \frac{2,2 \cdot 3}{2} = 3,3 \text{ Ом.} \quad (13)$$

Ток $I_{вх}$

$$I_{вх} = \frac{12}{3,3} = 3,64 \text{ А.} \quad (14)$$

Ток, идущий через каждый нагреватель,

$$I = I_{вх} = \frac{3,64}{2} = 1,82 \text{ А.} \quad (15)$$

Суммарная тепловая мощность

$$P = 6 \cdot 1,82 \cdot 2,2 = 43,7 \text{ Вт.} \quad (16)$$

Значение суммарной тепловой мощности P приблизительно равно значению расчетной мощности $P_{расч}$. При этом ток через каждый нагревательный элемент I_1 , I_2 не превышает максимально допустимого $I_{\max}$.

Погружение нагревателя в ПМС 20 обеспечивает его электрическую изоляцию. Питание нагревателя осуществляется от источника постоянного напряжения 12 В. Таким образом обеспечивается электрическая безопасность нагревателя.

Для точного регулирования температуры термостата и отображения показаний «эталонного» датчика применен измеритель-регулятор ТРМ10 – устройство, зарегистрированное в госреестре средств измерений.

В качестве «эталонного» датчика использован температурный датчик Pt100. Его метрологические характеристики подтверждены путем его поверки в метрологической лаборатории.

Схема соединения перечисленных элементов устройства для поверки датчиков температуры представлена на рис. 4.

Затраты на изготовление устройства были минимальны, так как большинство его комплектующих уже имелись на АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод». Нихромовые нагреватели, датчик температуры и другое хранились как запчасти со списанных приборов, ТРМ10 находился в резерве. Блок питания для нагревателя куплен за 1100 руб. Таким образом, итоговые затраты на термостат составили 1100 руб. Для сравнения стоимость калибратора Fluke, который может выполнять ту же функцию, что и изготовленное устройство, составляет более 200 000 руб. Эта разница делает очевидной экономическую выгодность данной работы.

Работает изготовленное устройство следующим образом. Нагреватель, «эталон» и проверяемый датчик располагаются в емкости с маслом, использование которого позволяет улучшить теплообмен между нагревателем и датчиками температуры, а также электрически изолировать нагреватель. С помощью ТРМ10 регулируется температура термостатирования, для точной регулировки применяется обратная связь по показаниям «эталона». Далее проводится оценка сходимости показаний «эталона» и проверяемого датчика. По результатам оценки делается вывод о работоспособности проверяемого датчика, и корректируются его показания.

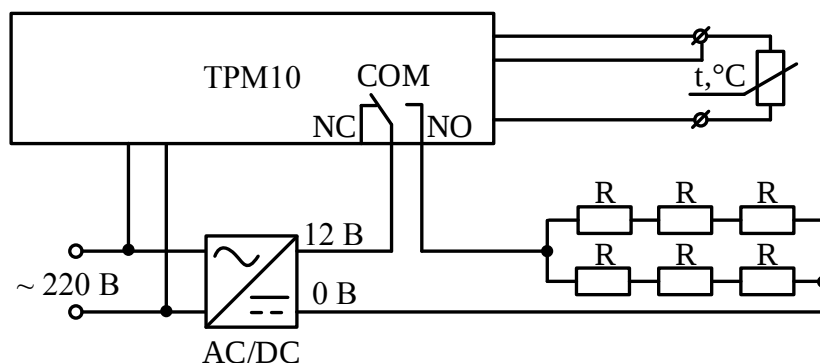


Рис. 4. Схема устройства для поверки датчиков температуры

Из соображений безопасности термостат используется в диапазоне температур от комнатной до 150 °С. При этом риск ожога является минимальным, так как емкость с маслом покрыта теплоизоляцией, а риск возгорания масла сводится к нулю, так как температура вспышки ПМС 20 превышает 200 °С [13].

Изготовленное устройство использовалось для поверки датчиков температуры аппаратов дистилляции и анализаторов температуры вспышки. Благодаря компактности и портативности устройство соответствует условиям эксплуатации испытательной лаборатории.

Портативное устройство для поверки датчиков температуры можно считать электрически и пожаро-безопасным приспособлением с подтвержденными метрологическими характеристиками. Его изготовление не требовало существенных материальных затрат, поэтому устройство на фоне альтернативных вариантов, предложенных на рынке, является экономически выгодным.

Использование устройства для поверки датчиков температуры – оперативное решение задачи технического обслуживания, обозначенной в руководствах по эксплуатации аналитического оборудования испытательной лаборатории, где ранее эта задача прямым образом не решалась. Исправление данного упущения позволит держать под контролем состояние датчиков температуры, являющихся ключевыми узлами многих приборов, поможет обеспечить надежную работу аналитического оборудования и улучшит качество контроля важнейших параметров сырья и продуктов АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод». Кроме того, описанное устройство может использоваться во многих других обстоятельствах, при которых необходима оперативная оценка работоспособности датчика температуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88). Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. Введ. 01.01.2001. 38 с.
2. Плотникова И.Н. Фракционный состав нефти и методы его изучения : учебно-методическое пособие. Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. 30 с.
3. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Введ. 01.01.1991. 100 с.
4. Автоматический анализатор для определения фракционного состава нефти и нефтепродуктов DIST-A1 : руководство по эксплуатации // ООО «Техно».
5. Автоматический анализатор температуры вспышки в закрытом тигле PMA-A1: руководство по эксплуатации // ООО «Техно».
6. Автоматический анализатор фракционного состава OptiDist: инструкция по эксплуатации системы // «PAC» inc.
7. FP93 5G2 автоматический анализатор для определения точки вспышки по методу Pensky-Martens FP93 5G2 : инструкция по эксплуатации и обслуживанию // «PAC» inc.
8. Анализатор температуры вспышки по методу Pensky Martens HFP 339 : инструкция по эксплуатации // «Walter Herzog GmbH» inc.
9. ГОСТ 8.461-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи из платины, меди и никеля. Методика поверки. Введ. 01.01.2011. 28 с.
10. Патент на полезную модель № 63063 U1 Российская Федерация, МПК G01L 23/04. Устройство поверки выходных параметров датчиков-реле температуры с парожидкостным наполнителем : № 2006144076/22 : заявл. 11.12.2006 : опубл. 10.05.2007 / Н.Н. Костин, В.А. Гаврилин, А.П. Василевский [и др.] ; заявитель Закрытое акционерное общество «ОРЛЭКС».
11. ТРМ 10. Измеритель ПИД-регулятор микропроцессорный одноканальный: руководство по эксплуатации // ООО «Производственное объединение ОВЕН». URL : https://owen.ru/uploads/rie_tm10_2617.pdf (дата обращения: 12.06.2025).
12. Михеев В.П., Просандеев А.В. Датчики и детекторы : учебное пособие. Москва : МИФИ, 2007. 172 с.
13. ГОСТ 13032-77. Жидкости полиметилсилоксановые. Технические условия. Введ. 01.01.1979. 19 с.

REFERENCES

1. GOST 2177-99 (ISO 3405-88). Nefteprodukty. Metody opredeleniya fraktsionnogo sostava [GOST 2177-99 (ISO 3405-88). Petroleum products. Methods for determining fractional composition]. Vved. 01.01.2001. 38 s.
2. Plotnikova I.N. Fraktsionny sostav nefi i metody ego izucheniya [Fractional composition of oil and methods for its study] : uchebno-metodicheskoe posobie. Kazan : Kazan (Privolzhskij) federal'ny universitet, 2013. 30 s.
3. GOST 12.1.044-89 (ISO 4589-84). Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov [GOST 12.1.044-89 (ISO 4589-84). Fire and explosion hazard of substances and materials]. Vved. 01.01.1991. 100 s.
4. Avtomaticheskij analizator dlya opredeleniya fraktsionnogo sostava nefi i nefteproduktov DIST-A1 [Automatic analyzer for determining the fractional composition of oil and petroleum products DIST-A1] : rukovodstvo po ekspluatatsii // ООО «Tekhno».
5. Avtomaticheskij analizator temperatury vspyshki v zakrytom tigre RMA-A1 [Automatic analyzer for flash point in a closed cup PMA-A1] : rukovodstvo po ekspluatatsii // ООО «Tekhno».
6. Avtomaticheskij analizator fraktsionnogo sostava OptiDist [Automatic fractional composition analyzer OptiDist] : instruktsiya po ekspluatatsii sistemy // «PAC» inc.
7. FP93 5G2 avtomaticheskij analizator dlya opredeleniya tochki vspyshki po metodu Pensky-Martens FP93 5G2 [FP93 5G2 automatic analyzer for determining flash point by Pensky-Martens method FP93 5G2] : instruktsiya po ekspluatatsii i obsluzhivaniyu // «PAC» inc.
8. Analizator temperatury vspyshki po metodu Pensky-Martens HFP 339 [Flash point analyzer by Pensky-Martens method HFP 339] : instruktsiya po ekspluatatsii // «Walter Herzog GmbH» inc.
9. GOST 8.461-2009. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Termopreobrazovateli iz platiny, medi i nikelya. Metodika poverki [GOST 8.461-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Platinum, copper, and nickel temperature sensors. Verification procedure]. Vved. 01.01. 2001. 28 s.
10. Patent na poleznuyu model' № 63063 U1 Rossijskaya Federatsiya, MPK G01L 23/04. Ustrojstvo poverki vyhodnyh parametrov datchikov-rele temperatury s parozhidkostnym napolnitelem [Utility model patent № 63063 U1 Russian Federation, IPC G01L 23/04. Device for checking output parameters of temperature relay sensors with a vapor-liquid filler] : № 2006144076/22 : zayavl. 11.12.2006 : opubl. 10.05.2007 / N.N. Kostin, V.A. Gavrilin, A.P. Vasilevsky [et al.]; zayavitel' Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo «ORLEKS».
11. TRM 10. Izmeritel' PID-regulyator mikroprotsessorny odnokanal'ny [TRM 10. Microprocessor-based single-channel PID controller] : rukovodstvo po ekspluatatsii // ООО «Proizvodstvennoye obyedineniye OVEN». URL : https://owen.ru/uploads/rie_trm10_2617.pdf (data obrashcheniya: 12.06.2025).
12. Mikheev V.P., Prosandeev A.V. Datchiki i detektory [Sensors and detectors] : uchebnoe posobie. Moskva : MIFI, 2007. 172 s.
13. GOST 13032-77. Zhidkosti polimetilsiloksanovye. Tehnicheskie usloviya [GOST 13032-77. Polymethylsiloxane fluids. Technical specifications]. Vved. 01.01. 1979. 19 s.

Информация об авторах

Д.С. Лосев – инженер цеха КИП АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод»;
А.В. Гуляев – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика».

Information about the authors

D.S. Losev – Engineer of the Instrumentation Department of JSC NNK-Khabarovsk Oil Refinery;
A.V. Gulyaev – Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics.

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025; принята к публикации 06.06.2025.
The article was submitted: 12.02.2025; approved after reviewing: 06.06.2025; accepted for publication: 06.06.2025.

Научная статья
УДК 621.391.823
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-54-60

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯМ

Сидорович Максим Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, msidorovich60@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено влияние отказов частичных подвесных изоляторов контактной сети железных дорог на график движения поездов, определены слабые места в диагностике частичных разрядов передвижными комплексами и их влияние на количество и время задержки поездов на Дальневосточной железной дороге. Предложены технические решения и алгоритмы для программно-аппаратного комплекса диагностики состояния контактной сети. Агрегирован опыт локализации источников радиоизлучения на основе измерений уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator, RSSI) или разницы времен прихода сигнала (Time Difference Of Arrival, TDOA), а также классификации частичных разрядов методами машинного обучения (Machine Learning, ML). Данные методики успешно апробированы на объектах железнодорожной инфраструктуры (железнодорожных станциях и перегонах), что доказывает возможность снижения количества отказов технических средств и сокращения задержек поездов по вине системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: частичные разряды, изоляторы контактной сети, программно-определяемое радио (SDR), диагностика контактной сети, локализация по уровню сигнала (RSSI), разностно-дальномерный метод локализации (TDOA), машинное обучение (ML), диагностика изоляторов, железнодорожный транспорт

Original article

DIAGNOSTICS SYSTEM FOR CATENARY LINE INSULATORS BASED ON RADIO EMISSIONS

Sidorovich Maksim A.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, msidorovich60@gmail.com

Abstract. The paper discusses the impact of partial overhead insulator failures in the railway contact network on train schedules, identifies weaknesses in diagnosis of partial discharges by mobile complexes and their effect on the amount and duration of train delays on the Far Eastern Railway. It proposes technical solutions and algorithms for a hardware and software complex to diagnose the contact network's condition. The paper aggregates experience in localizing radio sources based on measurements of Received Signal Strength Indicator (RSSI) and Time Difference Of Arrival (TDOA) values, as well as classifying partial discharges using machine learning (ML) methods. These techniques have been tested successfully at railway infrastructure facilities, such as railway stations and stages, which proves the possibility of reducing the number of technical failures and train delays caused by the traction power supply system.

Keywords: partial discharges, catenary line insulators, software-defined radio (SDR), catenary line diagnostics, localization by signal strength (RSSI), time-domain localization (TDOA), machine learning (ML), insulator diagnostics, rail transport

Благодаря расширению зоны электрифицированных железных дорог растет эффективность перевозочного процесса Восточного полигона железных дорог России. Система тягового электроснабжения переменного тока (СТЭ) снижает углеродный след и трудозатраты, обеспечивает ритмичность транспортного процесса и повышает экономические показатели железнодорожного транспорта. Правительство РФ и Правление ОАО «РЖД» сформулировали задачи в «Стратегии научно-технологического развития холдинга РЖД на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (Белая Книга)», направленные на повышение пропускной и провозной способности Восточного полигона при обеспечении высокого коэффициента готовности устройств контактной сети [1]. Однако природа элементов СТЭ не позволяет обеспечить

всеобъемлющее резервирование и требует своевременной диагностики их состояния и устранения выявленных аномалий и сбоев, что является гарантом бесперебойной работы как СТЭ, так и перевозочного процесса в целом.

Контактная сеть (КС) СТЭ представляет собой сложную и распределенную систему, требующую тщательной диагностики состояния ее элементов. Она непрерывна в пределах каждой зоны секционирования и функционирует в условиях интенсивных динамических нагрузок. Кроме того, КС также подвергается влиянию ветровых нагрузок, обледенения, грозových разрядов, а также резким колебаниям температур окружающей среды и значительным вибрациям от движения поездов [2].

Для выявления критических изменений состояния систем электрификации необходима систематическая работа по организации контрольных мероприятий, а также соответствующий задачам инструментарий [1, 3]. Согласно «Стратегии», основными мерами, направленными на снижение количества отказов технических средств и сокращение задержек поездов по вине хозяйства электроснабжения, являются оптимизация процессов мониторинга состояния устройств КС и снижение трудоемкости ремонтных работ технических устройств посредством применения современных методов и инструментов технической диагностики для стационарных и мобильных устройств [1]. В ходе цифровизации технологических процессов операторов линейной инфраструктуры особое внимание уделяется средствам диагностики [3]. С учетом того, что в 2024 г. грузооборот на сети железных дорог составил 3,1 трлн т·км, при этом по тарифному грузообороту в границах Восточного полигона обеспечен исторический максимум, вопрос надежности КС и обеспечения графика движения поездов выходит на первый план [4].

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [5]. Для подразделений Трансэнерго отказами являются такие нарушения работы устройств электроснабжения, как:

- порча, повреждение сооружений и устройств контактной сети;
- нарушение работы технологической связи и вычислительной техники из-за отсутствия электроэнергии (на время, более нормируемого), отклонения от нормативных значений напряжения в электроснабжении данных устройств.

Анализ отказов контактной сети, проведенный по данным системы комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ) в различных исследованиях, демонстрирует существенный вклад сбоев изоляторов КС в общее число отказов технических средств, приведших к нарушению графика движения поездов [6, 7]. Одним из типов предотказных состояний, требующих постоянного мониторинга и диагностики, являются частичные разряды (ЧР) в изоляторах контактной сети. По определению ГОСТ 20074-83, ЧР – это электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами [8].

В настоящее время ключевые способы диагностики ЧР на изоляторах на основе оптического-электронных (ультрафиолетового и инфракрасного) методов, при балльной оценке состояния железных дорог, не обеспечивают непрерывность мониторинга состояния и диагностику работоспособности изоляторов переменного тока на протяженных участках ДВОСТЖД. Оптоэлектронный метод с использованием камер ультрафиолетового спектра, установленных на пе-

редвижных диагностических комплексах, таких как ВИКС, ИНТЕГРАЛ и ЭРА, позволяет определить только 25 % от общего числа неисправных изоляторов [9]. Акустический способ подвержен влиянию источников шума и не может быть размещен на транспортных средствах, вследствие чего его использование является трудоёмким [10]. Радиоволновой способ в настоящее время на полигоне железных дорог не реализован, но глубоко исследован и нашел свое применение в электроэнергетике [11–13]. Недостатки радиоволнового способа заключаются в отсутствии количественной оценки характеристик ЧР и подверженности электромагнитным помехам от сторонних электротехнических устройств [14].

Помимо значительного снижения трудозатрат на диагностику изоляторов контактной сети, важным фактором является также минимизация негативного воздействия отказов изоляторов на эксплуатационную надежность железнодорожной инфраструктуры. Это выражается в сокращении количества и продолжительности задержек поездов, обеспечении стабильности графика движения, а также снижении потенциальных рисков для безопасности перевозок. При этом отказы в работе контактной сети оказывают существенное влияние на график движения поездов. Так, на полигоне Дальневосточной железной дороги за период с 2020 по 2023 гг. суммарное время задержки поездов по перекрытиям и разрушениям изоляторов составило 325,5 поездов-часов. Всего произошёл 21 инцидент. При этом по результатам расследований отказов ответственность в 13 случаях была отнесена к заводам-изготовителям, что составляет 62 %, а в остальных 38 % (8 случаев) – профильной дирекции ДВОСТЖД [15]. Распределение представленных выше причин по категориям отказов приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Категории отказов подвесных
изоляторов контактной сети**

Категория отказа	Количество отказов
1-я категория: приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения	10
2-я категория: приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 мин до 1 ч, либо к ухудшению эксплуатационных показателей	7
3-я категория: не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категории (учет этих отказов производится первоначально в рамках автоматизированных систем управления хозяйствами)	4

Общее количество поездов и время задержки по основным причинам отказов подвесных тарельчатых изоляторов приведено в табл. 2.

Таблица 2

**Задержки поездов
из-за отказов тарельчатых изоляторов**

Причина	Общее количество поездов, ед.	Общее время задержки поездов, ч
Пробой, перекрытие стеклянного тарельчатого подвесного изолятора контактной сети	315	207,34
Пробой, перекрытие прочего изолятора контактной сети	56	23,32
Разрушение стеклянного тарельчатого подвесного изолятора контактной сети	77	13,71
Пробой, перекрытие фарфорового тарельчатого подвесного изолятора контактной сети	81	50,32
Разрушение фарфорового тарельчатого натяжного изолятора контактной сети	43	30,98
Разрушение фарфорового тарельчатого подвесного изолятора контактной сети	1	0

Если рассмотреть диаграмму состояний и переходов контактной сети в состояние отказа, то можно определить, что её функционирование на основе методики, предложенной в [16], позволяет сформировать графы состояний тарельчатых изоляторов контактной сети (рис. 1).

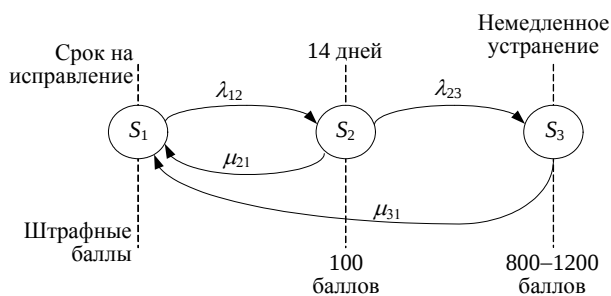


Рис. 1. Графы состояний и переходов тарельчатых изоляторов контактной сети в состояние отказа: S_1 – работоспособное состояние; S_2 – предотказное состояние (наличие ЧР); S_3 – неработоспособное состояние по причине пробоя или разрушения изолятора контактной сети; λ_{12} и λ_{23} – интенсивность отказов; μ_{21} и μ_{31} – интенсивность восстановлений

Рассмотрим подробнее интенсивность отказов и восстановлений при заданных отказах. Значение можно оценить как срок, выделенный для замены изолятора с ЧР, который составляет 14 календарных дней. Данное состояние является отступлением от норм содержания 3-й степени (100 штрафных баллов), которое при наличии неблагоприятных сочетаний может привести к повреждению контактной

сети или токоприемников подвижного состава. Однако при наступлении неблагоприятных условий происходит переход в состояние S_3 , приводящее к отказам 1-й или 2-й категории с 1200 или 800 штрафными баллами соответственно.

В ходе анализа потребностей сотрудников реального производственного сектора сформулирована гипотеза о том, что возможна разработка методов и алгоритмов локализации и классификации источников импульсных помех, вызванных неисправными элементами системы электроснабжения. Для снижения количества отказов технических средств, а также затрат на диагностику, необходимы меры по повышению эффективности поиска ЧР на изоляторах при локализации и классификации электромагнитных радиоизлучений. Программно-аппаратный комплекс как прототип подобного решения должен иметь модульную архитектуру. Структура системы диагностики КС на основе радиоволнового способа представлена на рис. 2.

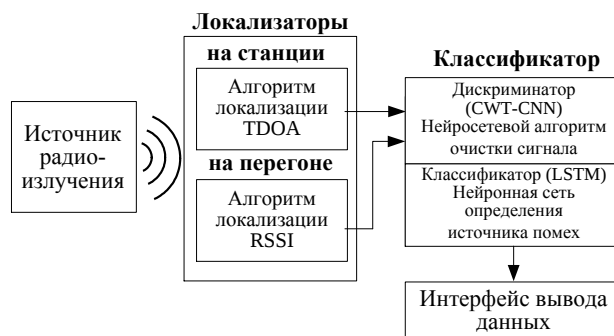


Рис. 2. Структура системы диагностики контактной сети на основе радиоволнового способа

При этом сигналы источника радиоизлучения передаются в программные блоки обработки, реализующие собственные функции, зависящие от локализации поиска и имеющие следующее назначение:

– локализаторы для станции и перегона. Разностно-дальномерный метод на основе задержки сигнала (TDOA) локализует источник радиоизлучения на станции [17]. Алгоритм поиска на основе анализа измерений уровня сигнала (RSSI) позволяет по уровню радиоизлучения локализовать источник радиоизлучения от ЧР вдоль железнодорожного пути [18];

– дискриминатор. Сверточная нейронная сеть (CWT-CNN) с предварительной вейвлет обработкой для классификации модуляции идентифицирует источник мешающих влияний от радиостанций и систем беспроводной передачи данных [19–22];

– классификатор [23]. Рекуррентная нейронная сеть (LSTM) для классификации электромагнитных возмущений, обученная на поиск радиоизлучения от ЧР и других источников мешающих влияний железнодорожной инфраструктуры.

Архитектура представленного решения схожа с подходом, где также предлагается использовать подобное оборудование для обнаружения источника радиоизлучения [24].

Основной задачей при диагностике ЧР как источника радиоизлучения является точное определение их координат при минимальных затратах на оборудование для поиска. В данном случае это радиопередающие объекты, и для их приема применяются универсальные и экономичные средства радиоприема в виде Software-Defined Radio (SDR) радиоприемников [25]. Следует отметить, что для обеспечения совместимости оборудования с диапазоном 2,13–2,15 МГц применялись адаптированные для этого диапазона версии с поддержкой режима Direct Sampling Mode и диапазона 500 кГц – 24 МГц. Использование гектометрового диапазона для диагностики методом радиоизлучений обусловлено его выделенностью для поездной радиосвязи (ПРС ГМВ). Это позволяет минимизировать воздействие обычного радиооборудования и повысить устойчивость к несанкционированным сигналам. Однако высокий уровень паразитных излучений в данном диапазоне негативно влияет на работу ПРС ГМВ, что стало одной из причин перехода радиосвязи на метровые волны [24].

Современные методы обработки данных и алгоритмы локализации обеспечивают эффективное получение и анализ информации о состоянии элементов электрифицированных железнодорожных путей посредством радиоволнового метода. Это позволяет точно выявлять и классифицировать поврежденные изоляторы, снижая негативное воздействие дефектов на транспортный процесс и повышая скорость диагностирования.

Задачу локализации источников радиоизлучения целесообразно разбить на отдельные компоненты на этапе разработки алгоритма. Это позволит снизить требования к вычислительной мощности и улучшить производительность разработчиков. При поиске неисправных изоляторов можно выделить два основных этапа: обнаружение местоположения и идентификацию её источника. Основными задачами при диагностике радиоволновым методом ЧР являются определение его координат, очистка полученных сигналов от мешающих радиоизлучений и классификация источника этих излучений. Алгоритм, используемый для решения данной задачи, приведен на рис. 3.

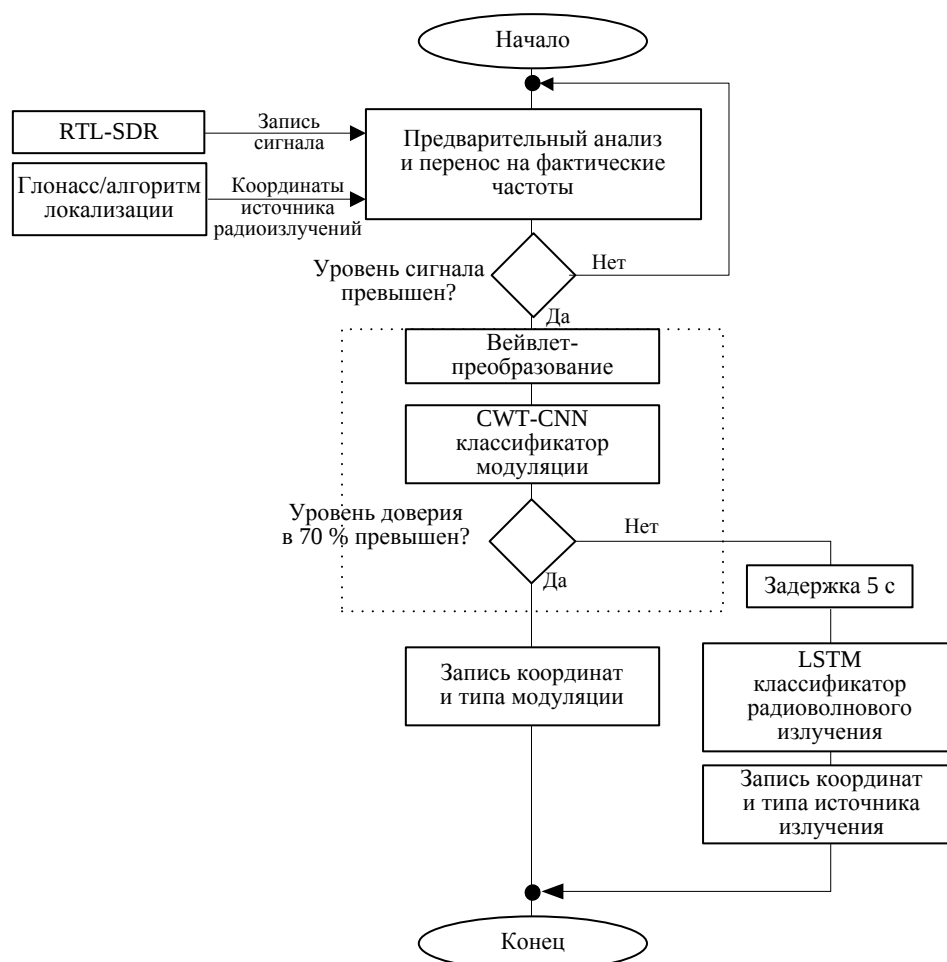


Рис. 3. Диаграмма алгоритма поиска источников электромагнитного радиоизлучения

Для реализации системы требуется реализация следующих блоков.

- 1) система модулей диагностики по радиоизлучениям – центральное устройство, проводящее агрегацию опыта для адаптации нейронной сети;
- 2) модули диагностики по радиоизлучениям – располагаются на станциях, представляют собой устройства, обеспечивающие синхронизацию и сбор данных с баз измерения;
- 3) базы измерения – модули для локализации источников радиоизлучения на станции, их задача – обеспечить локализацию методом TDOA;
- 4) измерительные модули – модули для радиоволновой диагностики контактной сети на перегоне (адаптированные для размещения на локомотиве, ВИКС или автомобиле).

На рис. 4 схематично представлено взаимодействие блоков системы диагностики на железнодорожных станциях и перегонах.

Работоспособность и эффективность метода подтверждены компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями. Результаты

показывают, что предложенный метод позволяет локализовать и классифицировать источник радиоволнового излучения от ЧР с точностью, представленной в табл. 3.

Таким образом, в рамках данной работы предложен усовершенствованный способ диагностики ЧР на изоляторах контактной сети, основанный на регистрации электромагнитных излучений. В целях реализации изложенного подхода разработаны технические и технологические решения, реализующие потенциал цифровизации железных дорог и гарантирующие бесперебойную работу КС через обеспечение оптимизации процессов мониторинга состояния устройств КС и снижение трудоемкости ремонтных работ технических устройств благодаря применению современных методов и инструментов технической диагностики для железнодорожных станций и перегонов, что доказывает возможность снижения количества отказов технических средств и сокращения задержек поездов по вине системы тягового электроснабжения.

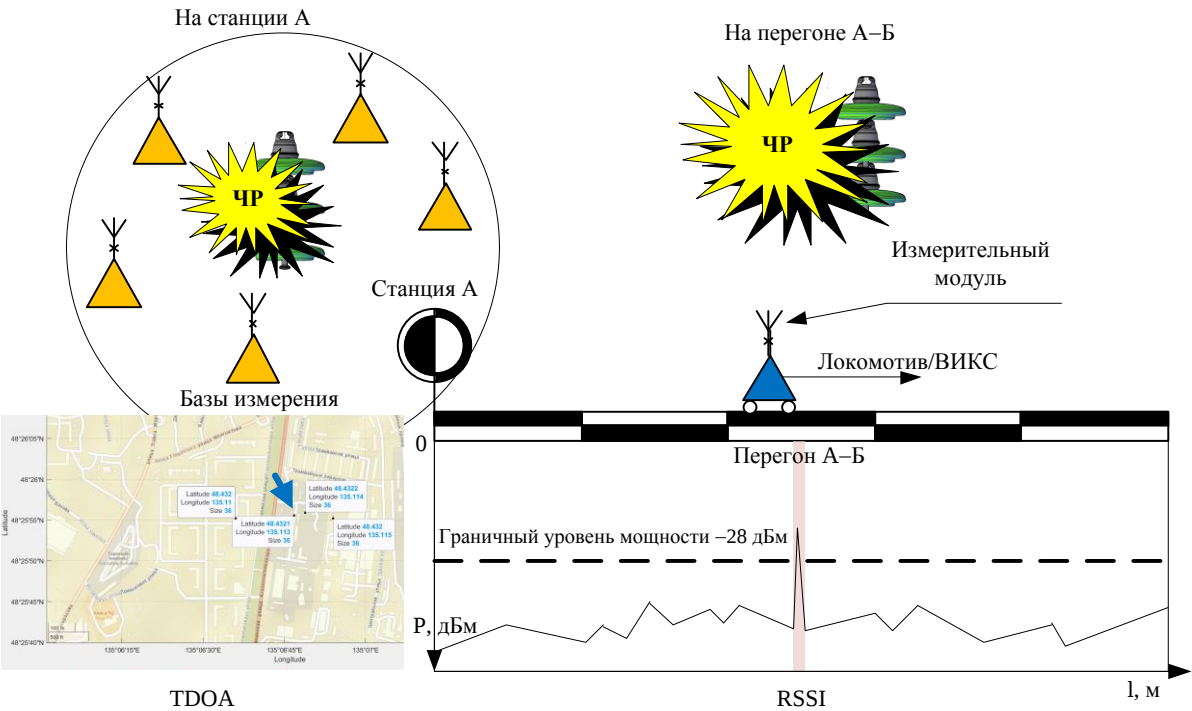


Рис. 4. Реализация системы радиоволновой диагностики ЧР

Таблица 3

Результаты, полученные в ходе исследования возможностей комплекса

Точность локализации ЧР на станции (TDOA) [24]	Точность локализации на перегоне (RSSI) [6]	Эффективность применения CWT-CNN-дискриминатора	Точность классификации ЧР LSTM по метрике Precision [23]
2,5 м	8 м	94,5 %	68,6 %

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. (Белая книга ОАО «РЖД») : утв. ОАО «РЖД». 2025. URL : <http://lawru.info/dok/2010/10/26/n211197/index.htm> (дата обращения: 26.08.2025).
2. Дербас Н.В., Леонтьев Р.Г. Влияние экстремальных природных условий на эффективность инвестиций в железнодорожное строительство на Дальнем Востоке РФ // Транспорт: наука, техника, управление. 2008. № 2. С. 34–38. EDN: ILIEZN.
3. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. (основные положения) // РЖД Документы. 2020. URL : https://ar2020.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (дата обращения: 12.01.2025).
4. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2024 г. 2024. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9354/page/2452802?id=312322> (дата обращения: 12.08.2025).
5. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200136419> (дата обращения: 28.03.2025).
6. Сидорович М.А., Пономарчук Ю.В. Совершенствование метода диагностики состояния контактной сети по радиоизлучениям // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 3(40). С. 80–86. EDN: GJFZIK.
7. Блинкова С.А., Скольский А.В. Оценка остаточного ресурса изоляторов контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1(93). С. 169–175. EDN: GKXGVI. doi:10.46973/0201-727X_2024_1_169
8. ГОСТ 20074-83 Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200011573> (дата обращения: 28.04.2025).
9. Повышение достоверности ультрафиолетовой диагностики изоляции контактной сети / Ф.Д. Железнов, Ю.И. Плотников, В.А. Акулов [и др.] // Железные дороги мира. 2011. № 4. С. 60–68. EDN: NXXVIB.
10. Сидорович М.А., Дербас Н.В. Оценка экономической эффективности радиоволнового способа диагностики частичных разрядов изоляторов контактной сети электрифицированных железных дорог // Транспортное дело России. 2024. № 5. С. 131–135. EDN: ULVBPM.
11. Куценко С.М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск : ИрГУПС, 2006. 148 с.
12. Галиева Т.Г. Метод и система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения частичных разрядов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2023. 142 с. EDN: NNOQMU.
13. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций : учебное пособие / А.И. Хальясмаа [и др.]. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 64 с.
14. Куценко С.М., Фёдоров М.Э. Методы дистанционной диагностики высоковольтной изоляции контактной сети // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4(44). С. 159–162. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-distantsionnoy-dagnostiki-vysokovoltnoy-izolyatsii-kontaktnoy-seti> (дата обращения: 23.08.2025).
15. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11.07.2016 г. № 1375р.
16. Ковалёв А.А., Андриков А.В. Исследование надежности работы устройств контактной сети железных дорог в условиях гололедообразования // Известия Транссиба. 2023. № 4(56). С. 120–125. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nadezhnosti-raboty-ustroystv-kontaktnoy-seti-zheleznyh-dorog-v-usloviyah-gololedoobrazovaniya> (дата обращения: 26.08.2025).
17. Сидорович М.А., Пономарчук Ю.В. Методы классификации радиочастотных помех в интеллектуальных транспортных системах // Транспортное дело России. 2023. № 6. С. 398–402. EDN: BSALHC. doi:10.52375/20728689_2023_6_398
18. Сидорович М.А., Пономарчук Ю.В. Моделирование радиоизлучения от поверхностного частичного разряда на изоляторах контактной сети железных дорог // Транспорт: наука, техника, управление. 2025. № 2. С. 34–39. EDN: FERLEX. doi:10.36535/0236-1914-2025-02-5
19. Метод вейвлет-анализа паттернов двигательной активности на экспериментальных данных многоканальной электроэнцефалографии человека для управления внешними устройствами / А.Е. Руннова, В.А. Максименко, С.В. Пчелинцева [и др.] // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1(92). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-veyvlet-analiza-patternov> (дата обращения: 15.06.2025).
20. О'Ши Т.Дж., Корган Дж., Клэнси Т.К. Сверточные сети распознавания модуляции : предварительный доклад. 2016.
21. О'Ши Т.Дж., Корган Дж., Клэнси Т.К. Беспроводная основанная на глубоком обучении радио-классификация сигнала // IEEE выбранных тем в обработке сигналов. 2018. Т. 12. № 1. С. 168–179.
22. Лю Х., Янг Д., Джамаль А.Э. Архитектуры глубоких нейронных сетей для классификации модуляций // Предварительная распечатка. 2018.
23. Sidorovich M., Ponomarchuk Y. Neural Networks Methods for Detecting Partial Discharges in Railway Insulators on the Basis of the Radio Emissions // 2024 7th Asia Conference on Cognitive Engineering and Intelligent Interaction (CEII) / IEEE Computer Society, 2024. Pp. 159–162.
24. Сидорович М.А., Савин Е.З. Поиск и идентификация источника радиопомех // Железнодорожный транспорт. 2022. № 6. С. 27–29. EDN: WPXRSH.
25. Burgess S. Minimal Problems and Applications in TOA and TDOA Localization. Lund University, 2016.

REFERENCES

1. Strategiya innovatsionnogo razvitiya OAO «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 g. (Belaya kniga OAO «RZhD») [Strategy for Innovative Development of JSC Russian Railways until 2015 («White Book» of JSC Russian Railways)] : utv. OAO «RZhD». 2025. URL : <http://lawru.info/dok/2010/10/26/n211197/index.htm> (data obrashcheniya: 26.08.2025).
2. Derbas N.V., Leontiev R.G. Vliyaniye ekstremal'nykh prirodnnykh usloviy na effektivnost' investitsiy v zheleznodorozhnoestroitel'stvo na Dal'nem Vostoke RF [The Impact of Extreme Natural Conditions on Investment Efficiency in Rail way Construction in Russia's Far East] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2008. № 2. S. 34–38. EDN: ILIEZN.
3. Strategiya razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2030 g. (osnovnye polozheniya)[Strategy for development of the holding company «RZD» until 2030 (main provisions)] // RZhD Dokumenty.2020. URL : https://ar2020.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (data obrashcheniya: 12.01.2025).
4. Godovoy otchet OAO «RZhD» za 2024 g. [Annual report of JSC Russian Railways for 2024]. 2024. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9354/page/2452802?id=312322> (data obrashcheniya: 12.01.2025).

5. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [GOST 27.002-2015 Reliability in engineering. Terms and definitions]. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200169346> (data obrashcheniya: 28.03.2024).
6. Sidorovich M.A., Ponomarchuk Yu.V. Sovershenstvovanie metoda diagnostiki sostoyaniya kontaktnoj seti po radioizlucheni-yam [Improvement of contact network condition diagnosis method based on radio emission analysis] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2024. № 3(40). Pp. 80–86. EDN: GJFZIK.
7. Blinkova S.A., Skolsky A.V. Otsenka ostatochnogo resursa izolyatorov kontaktnoj seti [Assessment of residual resource of contact network insulators] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. № 1(93). S. 169–175. EDN: GKXGVI. Doi: 10.46973/0201-727X_2024_1_169
8. GOST 20074-83 Elektrooborudovanie i elektroustanovki. Metod izmereniya kharakteristik chastichnykh razryadov [GOST 20074-83 Electrical equipment and installations. Method for measuring characteristics of partial discharges]. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200169346> (data obrashcheniya: 28.04.2024).
9. Povysheniye dostovernosti ul'trafiol'etovoy diagnostiki izolyatsii kontaktnoj seti [Improving the accuracy of UV diagnostics of contact network insulation] / F.D. Zheleznoy, Yu.I. Plotnikov, V.A. Akulov [et al.] // Zheleznye dorogi mira. 2011. № 4. Pp. 60–68. EDN: NXXVIB.
10. Sidorovich, M.A., Derbas N.V. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti radiovolnovogo sposoba diagnostiki chastichnykh razryadov izolyatorov kontaktnoj seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Economic evaluation of radiowave-based diagnostic technique for partial discharge detection at electrically powered railways] // Transportnoye delo Rossii. 2024. № 5. Pp. 131–135. EDN: ULVBPM.
11. Kutsenko S.M. Razrabotka distantsionnoy diagnostiki lineynoy izolyatsii kontaktnoj seti zheleznodorozhnogo transporta [Remote diagnosis of linear isolation in railway contact network] : diss. ... kand. tekhn. nauk. Irkutsk : IrGUPS, 2006. 148 s.
12. Galieva T.G. Metod i sistema monitoringa zagryaznenij i poverkhnostnykh defektov steklyannykh izolyatorov na osnove opredeleniya srednej moshchnosti elektromagnitnogo izlucheniya chastichnykh razryadov [Monitoring method and system for pollution and surface defects of glass insulators using average electromagnetic radiation from partial discharges]: dissertsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. 2023. 142 s. EDN: NNOQMU.
13. Diagnostika elektrooborudovaniya elektricheskikh stantsij i podstantsij : uchebnoe posobie [Diagnostics of electrical equipment at power stations and substations: Textbook] / A.I. Khalyasmaa [et al.]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 64 s.
14. Kutsenko S.M., Fyodorov M.E. Metody distantsionnoy diagnostiki vysokovol'tnoy izolyatsii kontaktnoj seti [Methods of remote diagnostics of high-voltage insulation in a contact network] // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2014. № 4(44). S. 159–162. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-distantsionnoy-diagnostiki-vysokovoltnoy-izolyatsii-kontaktnoy-seti> (data obrashcheniya: 23.08.2025).
15. Polozhenie ob uchete, rassledovanii i analize otkazov v rabote tekhnicheskikh sredstv na infrastrukture OAO «RZhD» s ispol'zovaniem avtomatizirovannoy sistemy KASANT [Regulations on accounting, investigation, and analysis of failures in technical facilities at JSC Russian Railways infrastructure using automated system KASANT] : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 11.07.2016 g. № 1375r.
16. Kovalev A.A., Andryukov A.V. Issledovanie nadezhnosti raboty ustroystv kontaktnoj seti zheleznykh dorog v usloviyakh gololedoobrazovaniya [Study of reliability of contact network devices under icing conditions] // Izvestiya Transsiba. 2023. № 4(56). S. 120–125. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nadezhnosti-raboty-ustroystv-kontaktnoy-seti-zheleznykh-dorog-v-usloviyah-gololedoobrazovaniya> (data obrashcheniya: 26.08.2025).
17. Sidorovich M.A., Ponomarchuk Yu.V. Metody klassifikatsii radiochastotnykh pomekh v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Classification methods of radio frequency interference in intelligent transport systems] // Transportnoye delo Rossii. 2023. № 6. Pp. 398–402. EDN: BSALHC. doi: 10.52375/20728689_2023_6_398
18. Sidorovich M.A., Ponomarchuk Yu.V. Modelirovanie radioizlucheniya ot poverkhnostnogo chastichnogo razryada na izolyatorakh kontaktnoj seti zheleznykh dorog [Modeling radio emission from surface partial discharge on contact network insulators of electric railways] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2025. № 2. Pp. 34–39. EDN: FERLEX. doi:10.36535/0236-1914-2025-02-5
19. Metod veyvlet-analiza patternov dvigatel'noj aktivnosti na eksperimental'nykh dannykh mnogokanal'noj elektroentsefalografii cheloveka dlya upravleniya vneshnimi ustrojstvami [Wavelet analysis method for motor activity pattern recognition based on multichannel human EEG data to control external devices] / A.E. Runnova, V.A. Maksimenko, S.V. Pchelintseva [et al.] // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2018. № 1(92). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-veyvlet-analiza-patternov> (data obrashcheniya: 15.06.2025).
20. O'Shea T.J., Corgan J., Clancy T.K. Svertochnyye seti raspoznavaniya modulyatsii [Convolutional modulation recognition networks] : Predvaritel'ny doklad. 2016.
21. O'Shea T.J., Corgan J., Clancy T.K. Besprovodnaya osnovannaya na glubokom obluchenii radio-klassifikatsiya signala [Wireless deep learning-based signal classification] // IEEE vybrannykh tem v obrabotke signalov. 2018. T. 12. № 1. S. 168–179.
22. Liu X., Yang D., Jamal A.E. Arkhitekury glubokikh neyronnykh setej dlya klassifikatsii modulyatsij [Architectures of deep neural networks for modulation classification] // Predvaritel'naya raspechatka. 2018.
23. Sidorovich M., Ponomarchuk Yu. Neural Networks Methods for Detecting Partial Discharges in Railway Insulators on the Basis of the Radio Emissions. // 2024 7th Asia Conference on Cognitive Engineering and Intelligent Interaction (CEII) / IEEE Computer Society, 2024. Pp. 159–162.
24. Sidorovich M.A., Savin Ye.Z. Poisk i identifikatsiya istochnika radiopomekh [Search and identification of radio noise source] Zheleznodorozhny transport. 2022. № 6. S. 27–29. EDN: WPXRSH.
25. Burgess, S. Minimal Problems and Applications in TOA and TDOA Localization. Lund University, 2016.

Информация об авторах

М.А. Сидорович – преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь».

Information about the authors

M.A. Sidorovich – Lecturer, Department of Automatics, Telemechanics and Communication.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.
The article was submitted: 15.08.2025; approved after reviewing: 15.09.2025; accepted for publication: 15.09.2025.

Научная статья
УДК 697.12.001.63
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-61-66

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО РАБОТЫ

Воприков Антон Владимирович^{1,2}

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, anton.voprikov@esa-center.ru

² Общество с ограниченной ответственностью «Центр автоматизации инженерных систем» (ООО «ЦАИС»), Хабаровск, Россия

Аннотация. Рассматриваются проблемы неравномерного распределения теплоносителя и высокой энергозатратности в системе центрального теплового пункта (ЦТП) предприятия. Представлена разработанная автором математическая модель, учитывающая как гидравлические, так и теплотехнические параметры. Особое внимание уделено методике построения целевой функции, включающей температурные отклонения, энергопотребление насосов и положение регулирующих клапанов. Приведены результаты моделирования различных сценариев: до и после реконструкции оборудования, а также после внедрения системы регулирования на вторичном контуре. Показано, что внедрение автоматизированного регулирования способствует снижению целевой функции более чем на 70 %, а достигнутая тепловая мощность приближается к установленной. Разработанная модель реализована в виде программного обеспечения на базе Excel и VBA. Предложены пути дальнейшего расширения функциональности модели, включая переход на язык программирования Python и учет динамических режимов. Работа ориентирована на повышение энергоэффективности ЦТП и надежности теплоснабжения.

Ключевые слова: тепловой пункт, теплообменник, математическая модель, оптимизация, целевая функция, энергосбережение, регулирование, насос, гидравлика, теплопередача

Original article

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A CENTRAL HEATING STATION OPERATION BASED ON A MATHEMATICAL OPTIMIZATION MODEL

Voprikov Anton V.^{1,2}

¹ Far Eastern State Transport University; Khabarovsk, Russia, anton.voprikov@esa-center.ru

² Engineering Systems Automation Center LLC, Khabarovsk, Russia

Abstract. The article addresses issues of uneven heat carrier distribution and high energy consumption in the operation of an enterprise's central heating station (CHS). A mathematical model developed by the author is presented, incorporating both hydraulic and thermal parameters. Particular attention is paid to the construction of the objective function, which includes temperature deviations, pump energy consumption, and control valve positions. Modeling results are provided for different operational scenarios – before and after equipment reconstruction, as well as after the implementation of regulation in the secondary circuit. It is shown that the introduction of automated regulation reduces the objective function by more than 70 %, with achieved heat output approaching the installed capacity. The model is implemented as Excel-based software using VBA. The paper proposes ways for further broadening the model's functionality, including transition to Python programming language and account for dynamic modes. The study is aimed at improving energy efficiency and operational reliability of CHS.

Keywords: heating station, heat exchanger, mathematical model, optimization, objective function, energy saving, regulation, pump, hydraulics, heat transfer

Введение

В условиях рыночной экономики повышение энергетической эффективности играет ключевую роль в обеспечении рентабельности промышленных предприятий. Этот приоритет закреплён в ряде нормативных документов [1–3].

Для России, с её продолжительными отопительными сезонами – от 180 до 300 суток в зависимости от региона – оптимизация процессов передачи и распределения тепловой энергии приобретает особое значение.

Цель такой оптимизации – повышение надёжности и эффективности теплоснабжения:

- за счёт равномерного распределения тепловых нагрузок между оборудованием;
- снижения отклонений температуры от заданного графика;
- устойчивости к изменениям температуры и давления в первичном контуре;
- предотвращения перегрева и переохлаждения во вторичном контуре;

- обеспечения безопасности работы трубопроводов и арматуры;
- минимизации рисков термических аварий.

Постановка проблемы

В центральных тепловых пунктах (ЦТП) регулирование температуры теплоносителя обычно осуществляется за счет регулирующих клапанов на первичном контуре. Во вторичном контуре такие клапаны, как правило, отсутствуют, и управление производится посредством частотного регулирования циркуляционного насоса (ЦН). Это позволяет адаптироваться к изменяющимся гидравлическим условиям и снижать энергопотребление.

Однако в реальных условиях эффективность ЦТП нередко падает из-за неравномерного распределения теплоносителя по теплообменникам, это обусловлено различиями в их гидравлических характеристиках. В ряде случаев один из теплообменников может получать поток, значительно превышающий его номинальную пропускную способность и тепловую мощность, что приводит к недостаточному нагреву теплоносителя во вторичном контуре и нарушению температурного графика.

Для выявления и устранения таких дисбалансов необходимо разработать математическую модель, способную учитывать как гидравлические, так и теплотехнические параметры оборудования. Это позволит проводить оценку режимов работы, оптимизировать управление насосами и клапанами, а также обеспечить соответствие температурных параметров заданному графику.

Например, в работе [4] представлена разработка методов оптимизации параметров централизованных систем теплоснабжения с целью повышения энергоэффективности, снижения потерь тепловой энергии и эксплуатационных затрат. Предложен подбор оптимальных диаметров и расходов теплоносителя на участках тепловой сети, с учетом теплотерь и гидравлических характеристик; корректировка графика зависимости температуры подающего трубопровода от температуры наружного воздуха для снижения затрат на топливо; ввод коэффициента соотношения тарифов на тепло- и электроэнергию в целевую функцию. Целевая функция формируется как сумма энергетических затрат, включающая потери в трубопроводах, энергию на перекачку теплоносителя и тепловые потери, показанная через аналитическое выражение. Следовательно, автор статьи демонстрирует аналитическую модель, ориентированную на инженерную оптимизацию проектных параметров и температурного графика.

Для решения рациональнее применить имитационное моделирование, имеющее более гибкий функционал (например, добавление компонент целевой функции и визуализацию откликов системы), работу автоматизации, реакцию системы на изме-

нение параметров, что позволит проводить численные эксперименты и учитывать в явном виде.

Математическая модель

В соответствии с [5–7] построим математический аппарат для решения поставленной проблемы. Распределение потока между ТО для контуров ТО рассчитаем по формуле

$$R_{\text{total}, i} = \frac{R_{\text{ном}, i}}{v_i}, v_i \in (0, 01 \dots 1, 0), \quad (1)$$

где $R_{\text{total}, i}$ – итоговое гидравлическое сопротивление контура; $R_{\text{ном}, i}$ – заданное относительное сопротивление контура, от. ед. i -го ТО; v_i – степень открытия клапана, %/100.

Весовая доля потока ω_i и массовый расход теплоносителя G_i в i -м контуре, кг/с, определяются по выражениям:

$$\omega_i = \frac{1/R_i}{\sum 1/R_j}, G_i = \omega_i G_{\text{общ}} \rho, \quad (2)$$

где ω_i – доля потока через i -й теплообменник; i – конкретный рассматриваемый теплообменник, для которого мы рассчитываем долю потока; j – индекс всех ТО ($j = 1, 2, \dots, N$); $G_{\text{общ}}$ – общий объемный расход воды, м³/с; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

Теплопередача через ТО ограничена номинальной мощностью. Фактическую передачу тепла ТО Q_i , Вт (Дж/с), i -му определим по выражению

$$Q_i = \min(G_{\text{II}, i} c_p (T_1 - T_3), Q_{\text{ном}, i}), \quad (3)$$

где $Q_{\text{ном}, i}$ – номинальная мощность i -го ТО, Гкал/ч, приведенные в Вт; T_1 – температура входа теплоносителя подающего трубопровода первичного контура (вход горячей среды), °С; T_3 – температура входа теплоносителя подающего трубопровода системы отопления вторичного контура (вход холодной среды), °С; I и II – первичный и вторичный контур ТО.

При этом температуру теплоносителя подающего трубопровода вторичного контура T_2 (выход холодной среды) и температуру теплоносителя обратного трубопровода первичного контура T_4 (выход горячей среды), °С, определим по выражениям:

$$T_2 = T_1 - \frac{Q_i}{G_{\text{II}, i} c_p}; \quad (4)$$

$$T_4 = \frac{Q_i}{G_{\text{I}, i} c_p} + T_3, \quad (5)$$

где c_p – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 градус (Кельвина или Цельсия), $c_p = 4180$ Дж/(кг·К).

Энергопотребление насосов P_n , кВт, определим по выражению

$$P_n = \frac{n Q_{\text{общ}} \rho g H}{\eta \cdot 1000}, \quad (6)$$

где n – число работающих насосов, шт.; $Q_{\text{общ}}$ – объемный расход, м³/с; H – напор, м; η – КПД насоса.

Целевая функция и её компоненты

Для одновременного нахождения наиболее рациональных параметров применим метод многокритериальной оптимизации, в которой объединим температурную ошибку (квадратичную), энергозатраты на насосы и отклонение положения клапана от оптимального. Объединение нескольких разных критериев качества работы системы ЦТП в одном числовом значении позволит сделать сравнение и найти оптимальный режим. Следовательно, для каждого i -го ТО определим индивидуальную целевую функцию J_i по формуле

$$J_i = \alpha (T_{2,i} - T_{\text{зад}})^2 + \beta P_n + \gamma \left(\frac{u_i - 50}{100} \right)^2 + \delta \left(\frac{Q_i - Q_{\text{ном}, i}}{Q_{\text{ном}, i}} \right)^2, \quad (7)$$

где α , β , γ и δ – весовые коэффициенты значимости параметра, имеющие соответственно размерность 1/°C², 1/кВт, 1/100 и 1/Вт; $T_{\text{зад}}$ – температура, определяемая по погодозависимому графику: $T_{\text{зад}} = -0,5 T_{\text{наруж}} + 75$, например, при $T_{\text{наруж}} = -20$ °C, $T_{\text{зад}} = 85$ °C; u_i – положение клапана, %; $Q_{\text{ном}, i}$ – номинальная тепловая мощность теплообменника, Вт; Q_i – фактическая тепловая мощность, Вт.

Суммарную целевую функцию J_{Σ} для m количества ТО определим по формуле

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m J_i. \quad (8)$$

Рассмотрим физический смысл целевой функции J_i , где каждое слагаемое отражает свой критерий оптимальности.

Первое слагаемое показывает, насколько фактическая температура подачи отличается от заданной по температурному графику, квадрат отклонения усиливает штраф за большие ошибки, а весовой коэффициент α задаёт важность точности нагрева; оно минимизирует отклонение от графика, что обеспечивает стабильное теплоснабжение.

Второе слагаемое учитывает общее энергопотребление насосов, включает в расчет стоимость электроэнергии или нагрузку на сеть, а также вес β , учитывающий, насколько важно экономить энергию в расчётах; оно позволяет найти режим с минимально возможной энергозатратой при прочих условиях.

Третье слагаемое увеличивает значение целевой функции за счет штрафа за слишком сильно открытый или закрытый клапан. Предполагается, что оптимальное положение клапан обеспечит минимум по двум другим слагаемым, а вес γ регулирует, насколько сильно система штрафует отклонение клапана от оптимального значения; оно защитит клапаны от перегрузки и обеспечит их надежную работу без нахождения в крайних положениях.

Четвертое слагаемое учитывает штраф за отклонение загрузки, т.е. чем ближе Q_i к $Q_{\text{ном}, i}$, тем меньше значение этого слагаемого, и тем лучше используется потенциал теплообменника. Коэффициент δ настраивается так: при большом значении модель стремится жестко соблюдать номинал, при меньшем – допускается небольшое отклонение.

Для определения оптимальных параметров системы использован метод итерации с ручной настройкой весов α , β , γ , δ , в рамках которых осуществляется пошаговый перебор управляющих воздействий: положений клапанов, частоты вращения насосов и суммарного расхода.

Программная реализация модели

Для вычисления и минимизации целевой функции J_{Σ} разработано программное обеспечение на базе Excel и Visual Basic for Applications, которое представляет собой имитационную модель, позволяющую анализировать распределение потоков и тепловых нагрузок в теплообменниках ЦТП. Программа учитывает гидравлические характеристики контуров, положение регулирующих клапанов, номинальные мощности теплообменников и температурные параметры первичного и вторичного контуров. Алгоритм работы ПО представлен на рисунке.

Такой подход позволяет проводить комплексный анализ работы ЦТП и обоснованно выбирать режимы управления, способствующие как поддержанию температурного графика, так и энергосбережению.

Согласно блок-схеме алгоритма (рисунок), на основе введенных пользователем исходных данных – гидравлического сопротивления, номинальных мощностей, температуры, положения клапанов и других параметров выполняется расчет для каждого j -го шага. В цикле определяются: массовые расходы через теплообменники; тепловая мощность; температура подачи/обратки; целевая функция для каждого ТО и общая до тех пор, пока не выполнится условие блока 12. После чего формируется таблица результатов, и при необходимости пользователь сохраняет данные в Excel.

Для проведения моделирования приняты реальные исходные данные основного оборудования ЦТП (табл. 1 и 2).

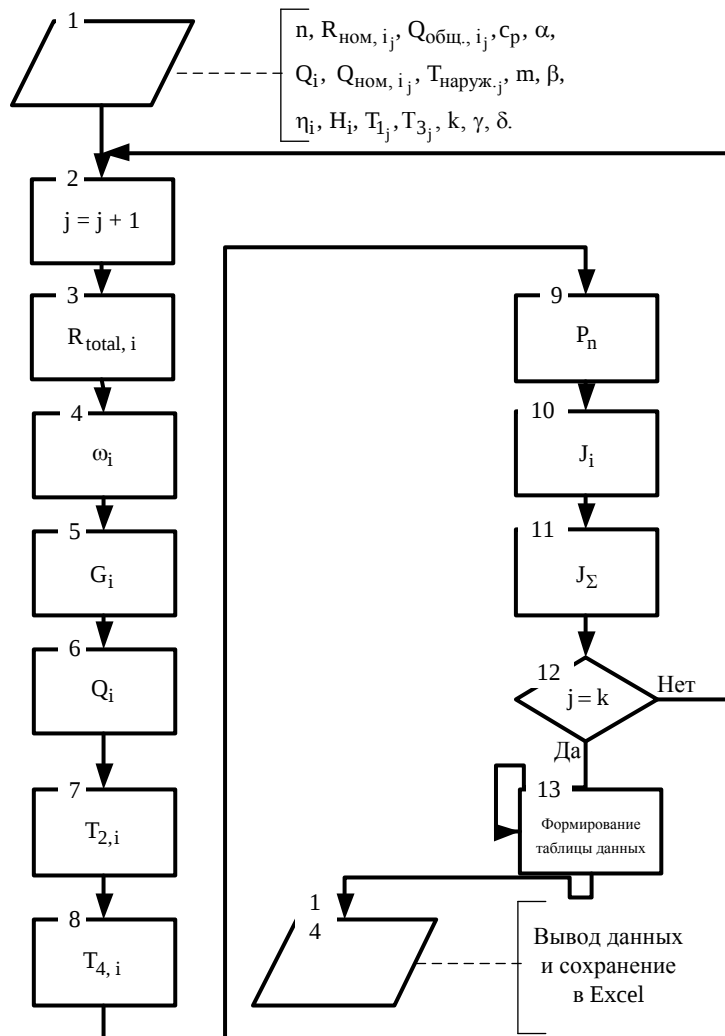


Рисунок. Блок-схема алгоритма работы ПО

Таблица 1

Исходный вариант основного оборудования ЦТП

Номер ТО	Тип ТО	Q, Гкал (МВт)	Ду, мм	ΔP, м.в.с.	ΔP, бар	R _{ном} , о.е.
I	Ридан № 41	5 (5,81)	150	5,69	0,558	0,558
II	Danfoss LSL4-0	5 (5,81)	150	9,05	0,887	0,887
III	Nord EO	7,5 (8,72)	300	0,58	0,0579	0,0579

Таблица 2

Новый вариант основного оборудования ЦТП

Номер ТО	Тип ТО	Q, Гкал (МВт)	Ду, мм	ΔP, м.в.с.	ΔP, бар	R _{ном} , о.е.
I	Ридан № 41	5 (5,81)	150	8,45	0,828	0,828
II	Nord Wh	7,5 (8,72)	200	1,58	0,155	0,155
III	Nord EO	7,5 (8,72)	300	0,58	0,0579	0,0579

Результаты моделирования

Результаты моделирования, в которых приняты: $\alpha = 0,02$, $\beta = 0,005$, $\gamma = 1,00$, $\delta = 3$, $T_1 = 90$ °C, $T_{\text{наруж}} = -30$ °C, $T_3 = 50$ °C и $G = 400$ м³/ч, позволяют сделать следующие выводы.

При исходном варианте ЦТП (табл. 1) распределение теплоносителя по ТО с подачей насоса G происходит следующим образом: I – 55,49 м³/ч,

II – 34,91 м³/ч и III – 309,61 м³/ч. Такой вариант распределения не рационален и приводит к тому, что высокий проток во вторичном контуре не позволяет третьему ТО обеспечить необходимый нагрев теплоносителя, ограничивая выполнение температурного графика по причине недостаточной мощности ТО. Следовательно, без регулирования передаваемая тепловая мощность Q первичного и вторичного кон-

туров всех ТО ЦТП составит около 12,92 МВт, что на 7,42 МВт или 36,48 % меньше установленной мощности ЦТП $Q_{уст} = 20,34$ МВт. При этом $J_{\Sigma} = 10,28$.

В новом варианте (после реконструкции ЦТП, табл. 2) распределение теплоносителя без регулирования положения клапанов следующее: I – 39,29 м³/ч, II – 141,45 м³/ч и III – 219,25 м³/ч. При этом $J_{\Sigma} = 5,33$, что на 48,15 % меньше исходного варианта; при $Q_{уст} = 23,25$ МВт, $Q = 16,35$ МВт, что на 29,68 % меньше установленной.

Методом итерации определены, согласно блок-схеме алгоритма (рисунок), оптимальные положения регулирующих клапанов на вторичные контуры ТО при $u_I = 100$ %, $u_{II} = 45$ % и $u_{III} = 35$ %, для которых $J_{\Sigma} = 2,82$. При этом $Q = 17,8$ МВт (76,56 % от $Q_{уст}$). Дальнейшая загрузка ТО и снижение J_{Σ} ограничены исходной подачей ЦН.

При изменении G до 551 м³/ч и положении клапанов $u_I = 100$ %, $u_{II} = 42$ % и $u_{III} = 27$ % выполняется условие $Q_{уст} = Q$, т.е. ЦТП работает в номинальной мощности.

Достижение описанного выше варианта достигается реконструкцией ЦТП [8], при которой предлагается дополнение к традиционному регулированию на первичном контуре: устанавливать регулирующие клапаны и на вторичном контуре теплообменников. Это позволяет изменять гидравлическое сопротивление и управлять протоком через каждый теплообменник. Контроль и управление осуществляются автоматизированной системой управления с использованием приводных клапанов, ультразвуковых расходомеров и частотного регулирования ЦН.

Выводы

1. Получена упрощенная математическая модель способная учитывать как гидравлические, так и теплотехнические параметры оборудования.
2. На основе математической модели выявляются и устраняются дисбалансы неравномерного рас-

пределения теплоносителя, делается оценка оптимального положения клапанов, режима работы насосного оборудования.

3. Определены параметры положения регуливающей арматуры ЦТП, обеспечивающие минимизацию целевой суммарной функции J_{Σ} .

4. Для улучшения математической модели можно добавить учет необходимых параметров труб, запорной и регуливающей арматуры, скорости потока, что позволит определять потери давления на элементах ЦТП.

5. Для расширения функциональности программы целесообразно использовать язык программирования, например, Python. Он предоставляет широкие возможности для технического моделирования и визуализации, а также богатый набор специализированных библиотек. Это позволит реализовать расчёт теплопередачи с использованием метода логарифмической средней разности температур, что существенно повысит точность моделирования теплообменных процессов. Кроме того, возможно добавление моделирования переходных процессов с применением обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), что обеспечит учёт динамики системы во времени и позволит анализировать её поведение в нестационарных режимах. В указанном языке доступны библиотеки для автоматической оптимизации параметров целевой функции J_{Σ} , что позволяет подбирать такие значения переменных (например, открытия клапанов, частоты насосов, расхода), при которых система будет работать наиболее эффективно с точки зрения заданных критериев.

6. Моделирование показало, что внедрение регулирующих клапанов на вторичном контуре обеспечивает снижение целевой функции J_{Σ} более чем на 70 %, приближая мощность системы к установленной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 г. : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р. 107 с.
2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ // Собрание законодательства РФ. 2009. № 48. Ст. 5711.
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ (с изм. и доп.).
4. Соломин И.Н., Даминов А.З., Садыков Р.А. Оптимизация режимов эксплуатации и параметров систем централизованного коммунального теплоснабжения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 2(44). С. 184–192.
5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.]. Москва : Альянс, 2010. 424 с.
6. Таранова Л.В. Теплообменные аппараты и методы их расчета. Тюмень : ТюмГНГУ, 2009. 152 с.
7. Насосы и насосные станции / В.Ф. Чебаевский, К.П. Вишневский, Н.Н. Накладов, В.В. Кондратьев ; под ред. В.Ф. Чебаевского. Москва : Агропромиздат, 1989. 416 с.
8. Проектная документация по реконструкции Центрального теплового пункта ЦТП-05032024. Разделы: ТМ – Тепломеханические решения; ЭМ, ЭС – Силовое электрооборудование и электроснабжение; АТХ – Автоматизация технических устройств; ЛСР – Сводный сметный расчет; ГР – Гидравлический расчет; ТР – Теплотехнический расчет. Хабаровск : ООО «ЦАИС», 2024.

REFERENCES

1. Energiticheskaya strategiya Rossijskoj Federatsii na period do 2050 g. [Energy Strategy of the Russian Federation until 2050] : utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 12 aprelya 2025 g. № 908-r .107 s.
2. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii [Federal Law No. 261-FZ of 23 November 2009 «On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation»] : federal'ny zakon ot 23.11.2009 g. № 261-FZ // Sobraniye zakonodatel'stva RF. 2009. № 48. S. 5711.
3. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii [Federal Law No. 261-FZ of 23 November 2009 «On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation»] : federal'ny zakon ot 23.11.2009 g. № 261-FZ (s izm. i dop.).
4. Solomin I.N., Daminov A.Z., Sadykov R.A. Optimizatsiya rezhimov ekspluatatsii i parametrov system tsentralizovannogo kommunal'nogo teplosnabzheniya [Optimization of operating modes and parameters of centralized district heating systems] // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2018. № 2(44). S. 184–192.
5. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives] // T.M. Bashta, S.S. Rudnev, B.B. Nekrasov [et al.]. Moskva : Allians, 2010. 424 s.
6. Taranova L.V. Teploobmennye apparaty i metody ikh rascheta [Heat exchangers and methods for their calculation]. Tyumen : TyumGNGU, 2009. 152 s.
7. Nasosy i nasosnye stantsii [Pumps and Pumping Stations] / V.F. Chebaevsky, K.P. Vishnevsky, N.N. Nakladov, V.V. Kondratyev ; pod red. V.F. Chebaevskogo. Moskva : Agropromizdat, 1989. 416 s.
8. Proektnaya dokumentatsiya po rekonstruktsii tsentral'nogo teplovogo punkta CTP-05032024. Razdely: TM – Termomekhanicheskie resheniya; EM, ES – Silovoe elektrooborudovanie i elektroснабzhenie; ATX – Avtomatizatsiya tekhnicheskikh ustroystv; LSR – Svodnyy smetnyy raschet; GR – Gidravlichesky raschet; TR – Teplotekhnicheskyy raschet [Design documentation for the reconstruction of the Central Heating Station CTP-05032024. Sections: TM – Thermomechanical solutions; EM, ES – Power electrical equipment and power supply; ATX – Automation of technical devices; LSR – Consolidated cost estimate; GR – Hydraulic calculation; TR – Thermal calculation]. Khabarovsk : OOO «CAIS», 2024.

Информация об авторе

А.В. Воприков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»; председатель правления ООО «ЦАИС».

Information about the author

A.V. Voprikov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems; Chairman of the Board, Engineering Systems Automation Center LLC.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.
The article was submitted: 03.06.2025; approved after reviewing: 30.06.2025; accepted for publication: 30.06.2025.

Научная статья
УДК 62-50:536.24
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-67-72

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ

Воприков Антон Владимирович^{1, 2}

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, anton.voprikov@esa-center.ru

² Общество с ограниченной ответственностью «Центр автоматизации инженерных систем» (ООО «ЦАИС»), Хабаровск, Россия

Аннотация. Представлена концепция повышения энергетической эффективности центрального теплового пункта (ЦТП) промышленного предприятия на основе внедрения автоматизированной системы управления и модернизации оборудования. Проанализированы недостатки текущей конфигурации ЦТП: износ теплообменников, неравномерная загрузка, отсутствие частотного регулирования насосов. Предложены технические решения: замена теплообменников, установка регулирующей арматуры на вторичных контурах, частотно-регулируемых насосов и расходомеров. Разработана и описана целевая функция многокритериальной оптимизации, учитывающая температурные отклонения, энергопотребление и положения клапанов. Показаны результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенных решений: снижение температурных отклонений с $\pm 5,2$ до $\pm 0,9$ °C, уменьшение потребления электроэнергии насосами в 2,3 раза и равномерная загрузка оборудования. Работа демонстрирует высокий потенциал масштабируемости предложенного подхода для других ЦТП с аналогичной структурой и является основой для внедрения цифровых технологий в теплоснабжение. Кроме того, реализация предложенных мер способствует повышению надёжности и адаптивности системы при сезонных колебаниях и аварийных режимах.

Ключевые слова: ЦТП, теплообменник, автоматизация, оптимизация, температурный график, насосное оборудование, энергосбережение, частотное регулирование

Original article

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL CENTRAL HEATING STATION THROUGH AUTOMATION AND TECHNICAL MODERNIZATION

Voprikov Anton V.^{1, 2}

¹ Far Eastern State Transport University; Khabarovsk, Russia, anton.voprikov@esa-center.ru

² Engineering Systems Automation Center LLC, Khabarovsk, Russia

Abstract. This study presents a concept for improving the energy efficiency of an industrial central heating station (CHS) through the implementation of an automated control system and equipment modernization. The current CHS configuration is analyzed, revealing its weaknesses such as worn-out heat exchangers, uneven loading, and lack of frequency regulation for pumps. Proposed technical solutions include replacing heat exchangers, installing control valves in secondary circuits, frequency-controlled pumps, and flow meters. An objective function of multi-criteria optimization which takes into account temperature deviations, energy consumption and valve positions, is developed and described. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed solutions: temperature deviations are reduced from $\pm 5,2$ to $\pm 0,9$ °C, pump energy consumption decreases 2,3 times, and equipment load is balanced. The study highlights the scalability of the proposed approach for other CHSs with similar configurations and serves as a foundation for implementing digital technologies in heat supply systems. Additionally, the proposed measures enhance system reliability and adaptability under seasonal fluctuations and emergency conditions.

Keywords: CHS, heat exchanger, automation, optimization, temperature schedule, pumping equipment, energy saving, frequency control

Введение

В условиях рыночной экономики мероприятия, обеспечивающие повышение рентабельности предприятий, играют существенную роль в их развитии. Повышение их энергетической эффективности регламентируется рядом нормативных правовых актов, стратегий и стандартов, указанных в [1–6].

Климатическая особенность России заключается в необходимости организовывать длительные отопительные периоды. Например, на территории северных и арктических регионов длительность таких

периодов может достигать 270–300 суток; Сибири и Дальнего Востока – 220–250 суток; Урала и северо-западной части РФ – 200–230 суток; Центральной России и Поволжья – 180–210 суток.

В таких условиях оптимизация технологического процесса передачи, обмена, распределения и потребления тепловой энергии имеет важное значение для роста рентабельности предприятий. В этой связи выделим основные критерии оптимизации [1–6]:

– увеличение срока службы оборудования за счет равномерного распределения тепловых нагрузок;

- минимизация отклонений температуры от заданного диапазона путем усовершенствования точности регулирования;
- повышение устойчивости к внешним возмущениям, таким как изменение температуры и давления в первичном контуре;
- предотвращение перегрева или переохлаждения оборудования во вторичном контуре;
- поддержание температуры в пределах, безопасных для материалов трубопровода и арматуры;
- снижение риска аварийных ситуаций, связанных с термическим расширением, конденсацией или кавитацией.

Постановка проблемы

В соответствии с вышеописанным, рассмотрим центральный тепловой пункт (ЦТП) предприятия, производящий передачу энергии от тепловой сети города к его системе отопления. Основное оборудования современных ЦТП: пластинчатые теплообменники (ТО), циркуляционные насосы (ЦН), регулирующая и запорная арматура.

Обычно в первичном контуре ТО устанавливаются регулирующие клапаны, позволяющие решить задачи погодозависимого регулирования. Во вторичном подобных клапанов нет, но может быть организовано частотное регулирование ЦН, дающее возможность оптимизировать параметры потребления электроэнергии, подстраиваться под переменную гидравлическую характеристику системы отопления предприятия.

На некоторых ЦТП снижение эффективности функционирования заключается в том, что распределение теплоносителя по ТО неравномерно, в первую очередь из-за разных гидравлических характеристик. Иногда поток теплоносителя распределяется таким образом, что на один ТО приходится значительно большая часть подачи от ЦН, чем на другие. При этом проток может значительно увеличить номинальную пропускную способность, превышающую тепловую мощность ТО. Такое обстоятельство делает невозможным обеспечение заданного нагрева теплоносителя, идущего в систему отопления предприятия, приводя к ограниченному выполнению температурного графика [7].

Анализ состояния реального ЦТП

Рассмотрим пример схемы (рис. 1) реального ЦТП, в состав которого входит: два ТО производительностью 5 Гкал с параметрами подключения D_y 150 мм, один ТО – 7,5 Гкал и D_y 300 мм, два параллельно подключенных ЦН разных номинальных мощностей и характеристик (подача и напор) без возможности частотного регулирования, три регулирующих клапана, установленных в первичный контур, а также система управления, содержащая щит управления (ЩУ) с типовым контроллером для систем отопления и датчики температуры.

В ходе обследований и выполнения проектирования, проводимых в период с 16.10.23 по 29.02.24 г. [7], установлены следующие проблемы в работе ЦТП:

- невозможность проведения ремонта, определения технических параметров и высокая вероятность выхода из строя теплообменника (ТО) компании Danfoss мощностью 5 Гкал с большим износом и нетиповой конфигурацией;
- невозможность перераспределения теплоносителя между теплообменным оборудованием и использования ТО в номинальном режиме по причине разного гидравлического сопротивления оборудования;
- невозможность обеспечения необходимой циркуляции устаревшим и низкоэффективным насосным оборудованием для съема номинальной мощности ТО, его функционирование в нерабочем поле своей номинальной паспортной характеристики с повышенным износом, что приводит к существенным затратам на электропотребление;
- превышение тепловой мощности нагрузки над номинальной мощностью теплообменного оборудования, снижающее возможность поддерживать рациональную температуру в подающем трубопроводе системы отопления;
- ограниченная возможность рациональной работы из-за разных характеристик оборудования. Например, при расходе $560 \text{ м}^3/\text{ч}$ наблюдалось следующее распределение протока через ТО: через ТО 7,5 Гкал проходило 80 % объема теплоносителя, остальные 20 % распределялись между двумя ТО 5 Гкал, что делало невозможным реализацию их установленной мощности в объеме 17,5 Гкал (19,78 Вт).

Предлагаемое техническое решение

Для устранения вышеуказанных проблем предлагается повышать эффективность за счет оснащения ЦТП дополнительным оборудованием и автоматизированной системой управления (АСУ), позволяющей оптимизировать энергетические параметры. Схема нового варианта конфигурирования ЦТП представлена на рис. 2.

Помимо общепринятой установки в первичный контур регулирующей арматуры (рис. 1), в работе предлагается устанавливать аналогичный клапан и во вторичном контуре теплообменника для изменения гидравлического сопротивления, влияющего на проток через ТО. Поддержание оптимального протока достижимо посредством АСУ, воздействующей на клапаны и режимы ЦН.

В каждом контуре ТО производится изменение и контроль расхода посредством регулирующего клапана с приводом и ультразвукового расходомера. Кроме того, во вторичном контуре расход изменяется более гибко за счет выбора режима подачи ЦН путем изменения их количества и частоты в соответствующий момент времени. Оптимальный расход должен обеспечивать поддержание заданной температуры контуров ТО при минимальных затратах на электроэнергию. Работу ЦН обеспечивает шкаф управления насосами (ШУН), параметры для работы которого задает АСУ.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ

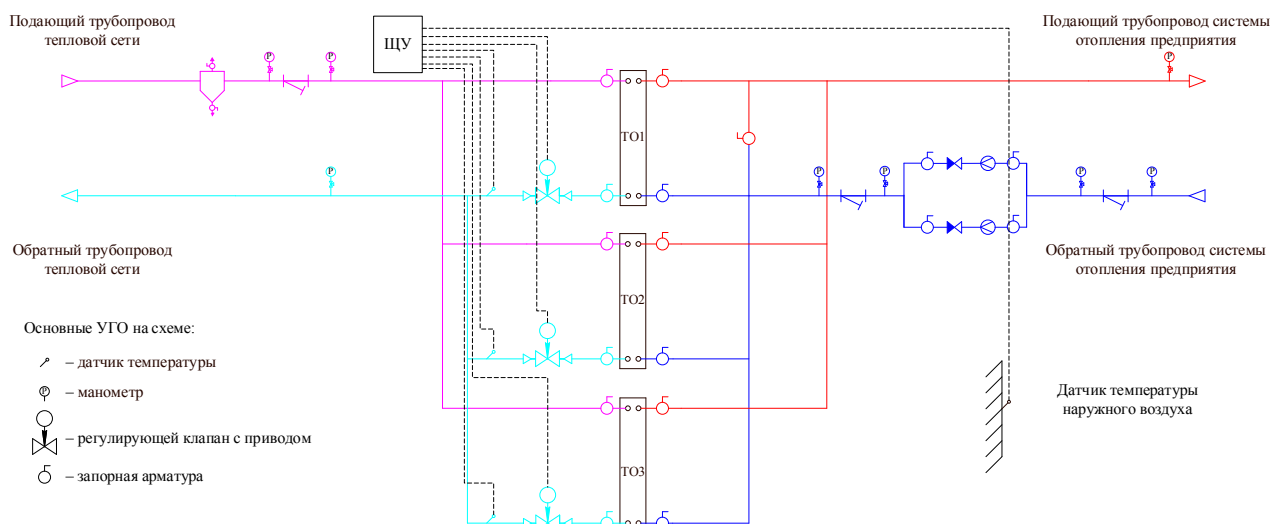


Рис. 1. Гидравлическая схема ЦТП со связями основного оборудования и системы управления, контроля в классическом варианте

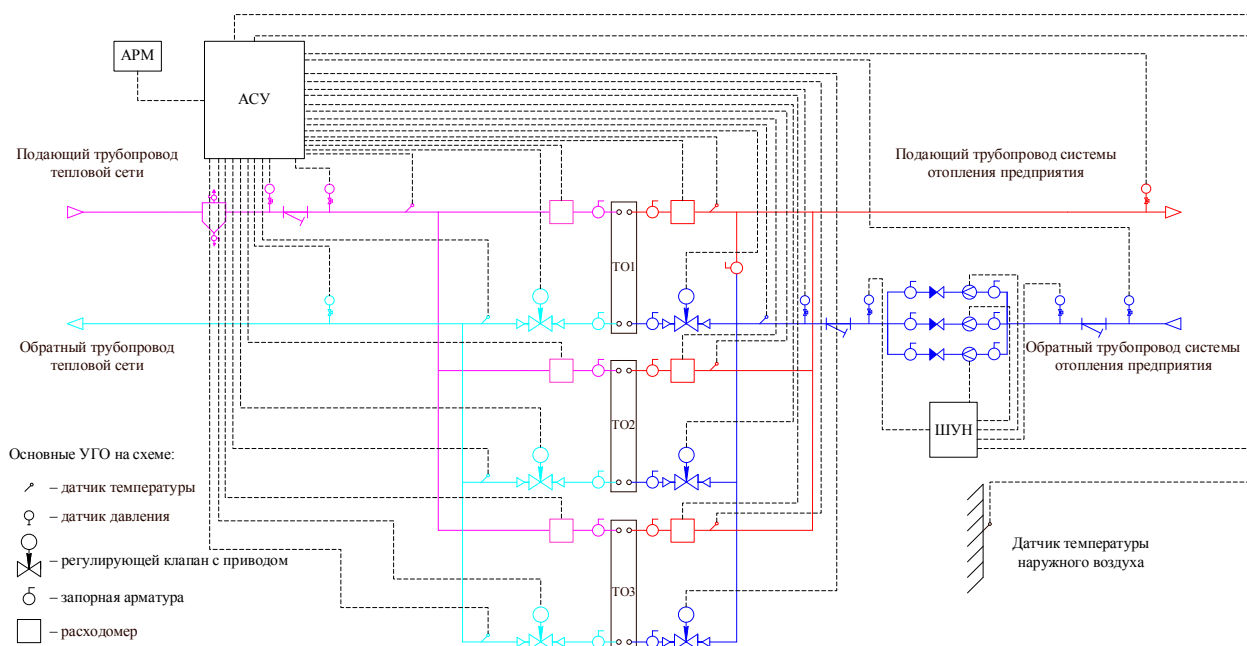


Рис. 2. Гидравлическая схема ЦТП со связями основного оборудования и системы управления, контроля в новом варианте

Температура подающего трубопровода вторичного контура ТО зависит от температуры наружного воздуха в холодное время года и определяется температурным графиком.

Описание оптимизационной модели

Суть процесса оптимизации заключается в определении режима подачи ЦН и положении регулирующей арматуры, обеспечивающей распределение расхода между теплообменниками для одинаковой их загрузки с целью более точного соблюдения температурного графика и устранения ранее перечисленных проблем.

Управляющими воздействиями являются частота вращения каждого ЦН f_j (25–50 Гц) и положение регулирующих клапанов на входе в теплообменники u_i (10–100 %).

Контролируемыми параметрами являются температура подающего трубопровода вторичного контура T_{2i} , температура обратного трубопровода первичного контура $T_{2i}^{обp}$ и объёмный расход теплоносителя вторичного контура G_{2i} .

Целевая функция и метод оптимизации

Построим целевую безразмерную функцию J оптимизации согласно положениям теплотехники [8–10] и гидравлики [11], а также данным, описанным ранее:

$$J = \alpha \sum_i \left(T_{2i}^{\text{расч}} + T_{2i}^{\text{зад}}(T_n) \right)^2 + \beta \sum_j P_j(f_j) + \gamma \sum_i \Phi_i(u_i),$$

где α , β и γ – весовые коэффициенты значимости параметра, имеющие соответственно размерность $1/^\circ\text{C}^2$, $1/\text{кВт}$ и $1/100$; $P_j(f_j)$ – мощность, потребляемая j ЦН, кВт; $T_{2i}^{\text{зад}}(T_n)$ – температурный график вторичного контура в зависимости от наружной температуры воздуха, $^\circ\text{C}$, рассчитывается как $a T_n + b$ [12], где $a = -0,5$, $b = 75$; $T_{2i}^{\text{расч}}$ – расчетная температура подающего трубопровода вторичного контура в зависимости от наружной температуры воздуха, $^\circ\text{C}$; $\sum_i \Phi_i(u_i)$ – функция ошибки за отклонение от рационального положения клапана.

Уравнение учитывает вклад от температурной ошибки между $T_{2i}^{\text{расч}}$ на каждом теплообменнике и $T_{2i}^{\text{зад}}(T_n)$, зависящей от наружной температуры воздуха, и отражает точность соблюдения температурного графика отопления; положения клапанов u_i влияют на $T_{2i}^{\text{расч}}$ и G_{2i} , а значит – косвенно на J через температуру и на энергопотребление насосов $P_j(f_j)$, т.е. на их нагрузку.

Следовательно, целевая функция J учитывает три основных аспекта:

- отклонение температур от расчетного температурного графика;
- энергопотребление насосов, зависящее от частоты вращения;
- положение регулирующих клапанов, определяющее гидравлическое сопротивление.

Формула позволяет взвешенно оценивать вклад каждого фактора:

- температурная компонента отвечает за соблюдение комфорта и безопасности;
- энергетическая – за эффективность расхода электроэнергии;
- положение клапанов – за корректную работу распределения потоков и стабилизацию нагрузки.

Весовые коэффициенты α , β и γ подбираются эмпирически.

Для решения целевой функции применен метод итерации и введены ограничения: $G_{2i} \leq G_{\text{max}i}$, $T_{2i} \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$, $f_j \in [f_{\text{min}}, f_{\text{max}}]$ и $u_i \in [0, 100]$. Принятые ограничения на параметры регулирова-

ния позволяют найти оптимальный баланс между качеством регулирования и энергетическими затратами при минимальных J .

Следовательно, для поиска минимальных J предложена математическая модель, учитывающая гидравлические, теплотехнические и электроэнергетические параметры. Результаты моделирования и поиска оптимальных J отражает таблица и рис. 3 и 4.

Таблица 1

Сравнение сценариев работы ЦТП до и после оптимизации

Показатель	До оптимизации	После оптимизации
Среднеквадратическое отклонение от графика, $^\circ\text{C}$	$\pm 5,2$	$\pm 0,9$
Среднее потребление ЭЭ насосов, кВт	$154,4 \times 1$	$66,7 \times 2$
Коэффициент загрузки ТОО-1/2/3	0,6/0,6/1,8	1,0/1,0/1,0
Частота насосов, Гц	50	34
Ожидаемая экономия, кВт·ч/сут	–	504

График зависимости температуры подающего трубопровода вторичного контура T_p от температуры наружного воздуха T_n (рис. 3) демонстрирует значительные колебания температурного режима теплообменников. Отклонения от температурного графика превышают $\pm 5,2$ $^\circ\text{C}$, что свидетельствует о неэффективной работе системы, неэффективном распределении теплоносителя и неравномерной нагрузке оборудования.

При условии эффективного управления результаты моделирования показывают, что температура стабилизируется, отклонения не превышают $\pm 0,9$ $^\circ\text{C}$. Это говорит о точном соблюдении температурного графика, равномерной нагрузке теплообменников и снижении энергозатрат (рис. 4).

Выводы

1. Предложенная модель оптимизации позволяет обеспечить не только энергетическую, но и эксплуатационную устойчивость системы: снижение аварийности и затрат на обслуживание.
2. Предложенное техническое решение повышает адаптивность системы к сезонным и аварийным изменениям нагрузок.
3. Установка нового ТОО производителя мощностью 7,5 Гкал обеспечит покрытие требуемой тепловой мощности предприятия с запасом на перспективу в размере 25 %.
4. Установка запорной и регуливающей арматуры трубопроводов обеспечит возможность оптимального распределения теплоносителя по ТОО и их номинальной загрузки, особенно во вторичных контурах.

5. Замена насосов с организацией их управления посредством преобразователей частоты (ПЧ) и АСУ позволит экономить электроэнергию, развивать номинальную тепловую мощность в 21 Гкал/ч, иметь резервы на случай непредвиденного ремонта в ЦТП.

6. Установка расходомеров, датчиков температуры и давления, регулирующих клапанов с приводом

и ПЧ обеспечит возможность разработать и внедрить современную систему автоматизации и управления, что упростит контроль и обслуживание, а также позволит максимально эффективно использовать энергетические ресурсы.

7. Возможность масштабирования технических решений для других ЦТП с подобной конфигурацией.

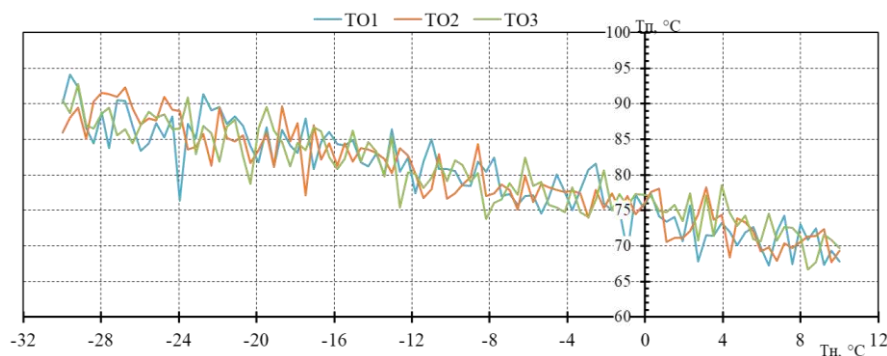


Рис. 3. График температурного режима теплообменников до оптимизации

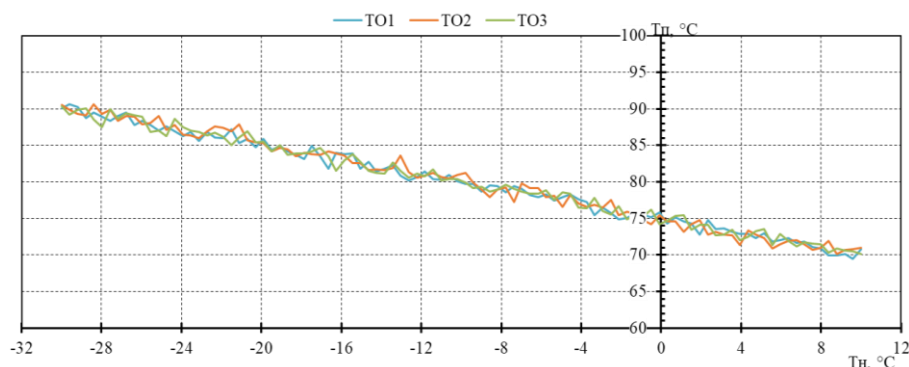


Рис. 4. График температурного режима теплообменников после оптимизации

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ // Собрание законодательства РФ. 2009. № 48. Ст. 5711.
2. О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности : постановление Правительства РФ от 01.12.2009 г. № 1225 // Собрание законодательства РФ. 2009. № 49. Ст. 5971.
3. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. : распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р // Официальный интернет-портал правовой информации. URL : www.pravo.gov.ru (дата обращения: 15.04.2025).
4. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ (с изм. и доп.).
5. ГОСТ Р 51749-2001. Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Виды. Типы. Группы. Показатели энергетической эффективности. Идентификация. Введ. 2002-01-01. Москва : Госстандарт России, 2001. 28 с.
6. ГОСТ Р ИСО 50001-2023. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению : утв. приказом Росстандарта от 16.02.2023 г. № 100-ст.
7. Проектная документация по реконструкции Центрального теплового пункта ЦТП-05032024. Хабаровск : ООО «ЦАИС», 2024. (Разделы: ТМ, ЭМ, ЭС, АТХ, ЛСР, ГР, ТР).
8. Дегтяренко А.В. Теплоснабжение: учебное пособие. Томск : ТГАСУ, 2010. 185 с.
9. Протасевич А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : учебное пособие. Минск : Новое знание ; Москва : Инфра-М, 2012. 286 с.
10. Амосов Н.Т. Теплофикация и теплоснабжение : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 237 с.
11. Дейнега В.В. Основы гидравлики и теплотехники : учебник. 2-е изд., доп. Костанай : Костанайполиграфник, 2010. 248 с.

12. Пырков В.В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование. Киев : ИД «Таки справы», 2008. 252 с.
13. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003; СП 60.13330.2020 : [утв. приказом Минстроя РФ от 30.12.2020 г. № 921/пр.]. Введен в действие с 01.07.2021. 123 с.

REFERENCES

1. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii [Federal Law No. 261-FZ of 23 November 2009 «On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation»] : federal'ny zakon ot 23.11.2009 g. № 261-FZ // Sobraniye zakonodatel'stva RF. 2009. № 48. S. 5711.
2. O trebovaniyakh k regional'nym i munitsipal'nym programmam v oblasti energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti [«On Requirements for Regional and Municipal Programs in the Field of Energy Saving and Energy Efficiency Improvement»] : postanovlenie Pravitel'stva RF ot 01.12.2009 g. № 1225 // Sobraniye zakonodatel'stva RF. 2009. № 49. S. 5971.
3. Ob utverzhdenii Energicheskoy strategii Rossijskoj Federatsii na period do 2035 g. [«On Approval of the Energy Strategy of the Russian Federation until 2035»] : rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06. 2020 g. № 1523-r // Ofitsial'ny internet-portal pravovoj informatsii. URL : www.pravo.gov.ru (data obrashcheniya 15.04. 2025).
4. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii [Federal Law № 261-FZ of 23 November 2009 «On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation»] : federal'ny zakon ot 23.11.2009 g. № 261-FZ (s izm. i dop.).
5. GOST R 51749-2001. Energopotrebyayushchee oborudovanie obshchepromyshlennogo primeneniya Vidy. Tipy. Gruppy. Pokazateli energeticheskoy effektivnosti. Identifikatsiya [GOST R 51749-2001. General industrial energy-consuming equipment. Types. Groups. Indicators of energy efficiency. Identification]. Moskva : Gosstandart Rossii, 2001. 28 s.
6. GOST R ISO 50001-2023. Sistemy energeticheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukvodstvo po primeneniyu [GOST R ISO 50001-2023. Energy mnagement systems. Requirements and guidance for use] : utv. prikazom Rosstandarta ot 16.02. 2023 g. № 100-st.
7. Proektnaya dokumentatsiya po rekonstruktsii tsentral'nogo teplovogo punkta CTP-05032024. Khabarovsk : OOO TsAIS, 2024. (Razdely: TM, EM, ES, ATX, LSR, GR, TR) [Project documentation for the reconstruction of Central Heating Station CTP-05032024. (Sections: TM, EM, ES, ATX, LSR, HR, TR)].
8. Degtyarenko A.V. Teplosnabzhenie [District Heating]: uchebnoe posobie. Tomsk : TGASU, 2010. 185 s.
9. Protasyevich A.M. Eenergoberezhenie v sistemakh teplogazosnabzheniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha [Energy saving in systems of heat and gas supply, ventilation and air conditioning] : uchebnoe posobie. Minsk : Novoye Znaniye; Moskva : Infra-M, 2012. 286 s.
10. Amosov N.T. Teplofikatsiya i teplosnabzhenie [District Heating and Heat Supply] : uchebnoe posobie. Sankt-Petersburg : Izd-vo Polytehn. un-ta, 2010. 237 s.
11. Deinega V.V. Osnovy gidravliki i teplotekhniki [Fundamentals of hydraulics and heat engineering] : uchebnik. 2-e izd., dop. Kostanay : Kostanaypoligrafnik, 2010. 248 s.
12. Pirkov V.V. Sovremennye teplovye punkty. Avtomatika i regulirovanie [Modern Heating Units. Automation and Regulation]. Kyiv : ID «Taki Spravy», 2008. 252 s.
13. Svod pravil. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. SNiP 41-01-2003; SP 60.13330.2020. [Building Code. Heating, ventilation and air conditioning. SNiP 41-01-2003; SP 60.13330.2020] : utv. prikazom Ministroya RF ot 30.12.2020 g. № 921/pr. Vveden v dejstvie s 01.07. 2021. 123 s.

Информация об авторе

А.В. Воприков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»; председатель правления ООО «ЦАИС».

Information about the author

A.V. Voprikov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems; Chairman of the Board, Engineering Systems Automation Center LLC.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.
The article was submitted: 03.06.2025; approved after reviewing: 30.06.2025; accepted for publication: 30.06.2025.

Научная статья
УДК 621.311
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-73-80

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Гателюк Олег Владимирович¹, Незевак Владислав Леонидович², Павлова Раиса Витальевна³

^{1, 2, 3} Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

¹ oleg.gatelyuk.61@mail.ru

² ostu_ietpss_articles@mail.ru

³ raiskapavlova2003@mail.ru

Аннотация. Преобразовательная техника тяговых подстанций постоянного тока оказывает влияние на качество напряжения на шинах переменного тока, к которым присоединены линии нетягового электроснабжения и трансформаторы собственных нужд. На шинах низшего напряжения трансформаторов собственных нужд, обеспечивающих питание линий электроснабжения сигнализации, централизации и блокировки, наблюдается несинусоидальность напряжений. Преобладающие высшие гармоники напряжения при этом определяются режимами работы преобразовательных агрегатов тяговых подстанций и схемами выпрямления. При увеличении электротяговой нагрузки наблюдается рост высших гармоник, который может приводить к нарушению безопасности движения поездов. К одному из направлений решений указанной проблемы относится повышение качества электроэнергии за счет применения пассивных или активных электрических фильтров на стороне низшего напряжения. Для решения задач данного направления требуется определить статистические показатели высших гармоник. Цель статьи – оценка мощности высших гармоник на примере регистрации и анализа качества электроэнергии в системе собственных нужд и выбор наиболее подходящего распределения. На основе статистических критериев в работе выполнена проверка теоретических законов, из которых наиболее подходящим признан закон распределения Вейбулла–Гнеденко. Приведена оценка совпадения экспериментальной и теоретической кумулятивной функции плотности вероятности, абсолютная ошибка для мощности фаз в системе собственных нужд по результатам расчетов находится на уровне 2–3 %.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, постоянный ток, система собственных нужд, высшие гармоники, мощность гармоник, плотность вероятности, закон распределения

Original article

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF POWER OF THE HIGHER HARMONIC COMPONENTS IN THE SYSTEM OF AUXILIARY POWER REQUIREMENTS OF TRACTION SUBSTATIONS

Gatelyuk Oleg V.¹, Nezevak Vladislav L.², Pavlova Raisa V.³

^{1, 2, 3} Omsk State Transport University, Omsk, Russia

¹ oleg.gatelyuk.61@mail.ru

² ostu_ietpss_articles@mail.ru

³ raiskapavlova2003@mail.ru

Annotation. The conversion technology of DC traction substations affects the quality of voltage on AC buses, to which non-traction power supply lines and transformers for auxiliary power requirements are connected. Voltage non-sinusoidality is observed on the low-voltage busbars of transformers for auxiliary power requirements, which provide power to the alarm, centralization and blocking power supply lines. The prevailing higher voltage harmonics are determined by the operating modes of the converter units of traction substations and rectification circuits. With an increase in the electric traction load, an increase in higher harmonics is observed, which can lead to a violation of train traffic safety. One of the ways to solve this problem is to improve the quality of electricity through the use of passive or active electrical filters on the low-voltage side. To solve the problems of this area, it is necessary to determine the statistical indicators of high harmonics. The purpose of the article is to evaluate the power of higher harmonics using the example of the registration and analysis of the quality of electricity in the system of auxiliary power requirements and the choice of the most appropriate distribution. Based on statistical criteria, the paper verifies theoretical laws, of which the Weibull-Gnedenko distribution law is considered the most appropriate. The estimation of the coincidence of the experimental and theoretical cumulative probability density functions is given, the absolute error for the phase power in the system of auxiliary power requirements is at the level of 2-3 percent according to the calculation results.

Keywords: traction power supply system, traction substation, direct current, system of auxiliary power requirements, higher harmonics, harmonics power, probability density, law of distribution

Повышение качества электроэнергии на шинах тяговых подстанций постоянного тока относится к актуальным задачам, что обусловлено влиянием высших гармоник напряжения на устойчивую работу нетяговых потребителей, в том числе потребителей, обеспечивающих безопасность движения поездов. Указанное влияние объясняется схемными решениями подключения нетяговых потребителей, питающие линии которых присоединены к шинам переменного тока вместе с преобразовательными трансформаторами. В зависимости от схемы выпрямления и уровня тяговой нагрузки изменяется уровень высших гармоник напряжения на шинах нетяговых потребителей [1–4].

В ряде случаев рост несинусоидальности приводит к сбоям в аппаратуре электропитания, в частности в аппаратуре с контролем чередования фаз, которая применяется на микропроцессорных постах электрической централизации. Одним из решений снижения несинусоидальности является применение фильтров, позволяющих снизить уровень наиболее выраженных высших гармоник. Параметры указанных фильтров выбираются в зависимости от преобладающих гармоник (5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники) и их мощности.

Для анализа случайных процессов используются как экспериментальные данные, так и результаты имитационного моделирования, позволяющие сформировать выборки для энергетических показателей и показателей качества электроэнергии [5, 6].

В виде данных для оценки гармонических искажений используются результаты регистрации показателей качества электроэнергии, выполненные с помощью анализаторов качества «Энерготестер ПКЭ» на тяговой подстанции. Измерения выполнены путем подключения анализаторов качества к шинам 0,4 кВ и позволяют зарегистрировать усредненные значения высших гармоник тока и напряжения. По данным измерений выполнена оценка мощности высших гармоник пофазно. Эксплуатирующийся на тяговой подстанции двенадцатипульсовый выпрямитель определяет порядок доминирующих гармоник напряжения (11-я и 13-я), в отношении которых выполнена оценка их мощности.

Гистограммы высших гармоник напряжения и тока, полученные по результатам обработки данных регистрации показателей качества электроэнергии в системе собственных нужд тяговой подстанции на двух вводах 0,4 кВ при раздельном питании приведены на примере фазы А на рис. 1 и 2 соответственно. Наибольшие напряжения высших гармоник зарегистрированы для 11-й и 13-й гармоник.

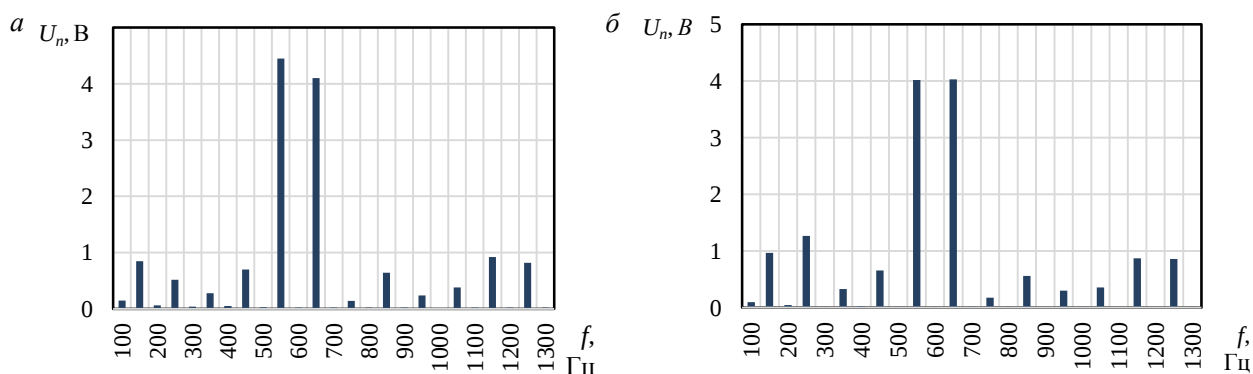


Рис. 1. Диаграммы спектра напряжений вводов ТСН: а – 1-0,4; б – 2-0,4

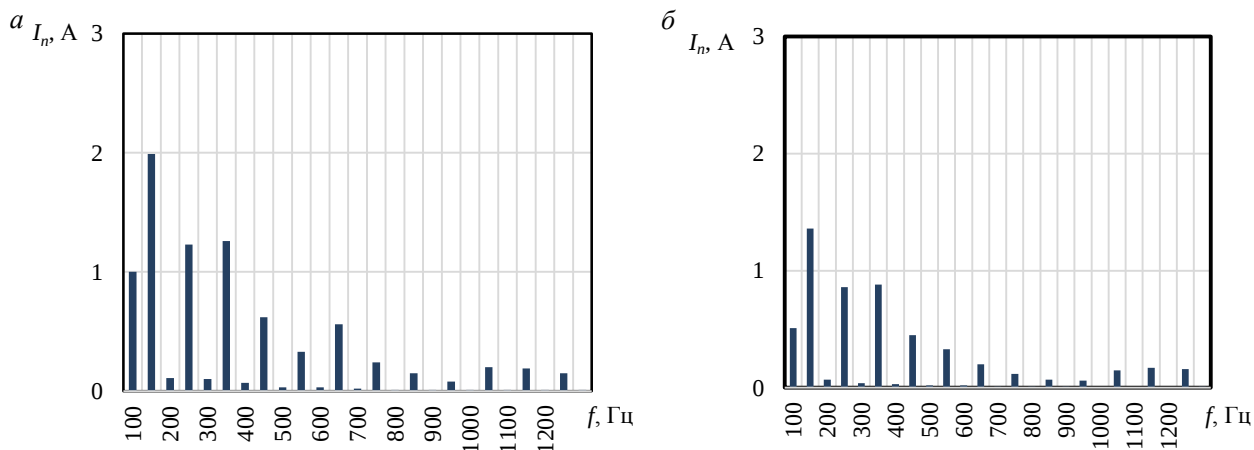


Рис. 2. Диаграммы спектра токов вводов ТСН: а – 1-0,4; б – 2-0,4

Оценка мощности высших гармоник суммарно по фазам, регистрируемых на вводах ТСН, позволяет выделить преобладающие, к которым в рассматриваемом случае относятся нечетные гармоники до 13-й включительно, при этом наибольшая мощность наблюдается у 11-й гармоники для обоих ТСН подстанции. Если уровень мощности нечетных гармоник с частотой в диапазоне 150–450 Гц обусловлен нелинейной нагрузкой потребителей, подключенных к шинам 0,4 кВ, то для 11-й и 13-й гармоник основной причиной является искажение напряжения, вызванное работой преобразовательных агрегатов с двенадцатипульсовой схемой выпрямления последовательного типа.

При регистрации измерений на шинах тяговых подстанций средние значения напряжений по фазам находятся в диапазоне 3–4 В, максимальные достигают уровня 8–9 В, при этом ток высших гармоник в среднем находится на уровне 0,5 А, а максимальные значения не превышают 2 А. Результаты измерений мощности гармоник приведены на рис. 4.

Мощность высших гармоник определяется током и напряжением, являющихся случайными величинами, и относится к величинам непрерывного типа. При решении задач по повышению качества электроэнергии представляет интерес функция плотности распределения мощности для преобладающих в спектре высших гармоник и разработки соответствующих технических мероприятий.

С целью получения представления об основных закономерностях изменения мощности высших гармоник выполнен выбор закона распределения, наиболее подходящего для описания полученных статистических данных.

Эмпирические функции плотности вероятности для мощности высших гармоник за период регистрации показателей электроэнергии на шинах 0,4 кВ тяговой подстанции пофазно приведены на рис. 5. Полученные эмпирические функции содержат основную информацию о результатах эксперимента и позволяют сделать эмпирические оценки нахождения мощности высших гармоник по диапазонам значений.

Полученные эмпирические функции распределения плотности мощности высших гармоник используются при оценке эффективности технических решений по повышению качества электроэнергии, например, при выборе схемы и определении параметров пассивных или активных электрических фильтров, проведении имитационного моделирования данных устройств в различных режимах работы системы тягового электроснабжения.

Для оценки соответствия теоретических законов распределения случайных непрерывных величин по-

лученным эмпирическим функциям распределения плотности мощности высших гармоник рассмотрены нормальное и экспоненциальное распределения, а также распределение Вейбулла–Гнеденко.

При выборе закона распределения в зависимости от объема и характера наблюдаемых данных используется ряд статистических критериев, для анализа рассматриваемых данных применяются следующие: Шапиро–Уилка, критерий согласия Пирсона (χ^2 -критерий), критерий Колмогорова–Смирнова, критерий Крамера–Мизеса и статистика Жака–Бера (табл. 1).

Приведенные статистические критерии отличаются по чувствительности к отклонениям от заданного распределения, устойчивости к объему выборки, универсальности применения и вычислительной сложности. При рассмотрении задач оценки качества электроэнергии рассматриваются приведенные выше статистические критерии для выбора наиболее подходящего.

Общий порядок выбора распределения, соответствующего эмпирическому, содержит следующие этапы:

- подготовка и обработка данных, построение гистограммы эмпирической функции распределения;
- определение статистических критериев;
- определение критических значений статистических критериев для заданного уровня значимости;
- выбор распределения, для которого гипотеза не отвергается и статистический критерий показывает наименьшее расхождение.

Статистический критерий Шапиро–Уилка [7, 8] относится к критериям нормальности и используется для проверки нулевой гипотезы о нормальности распределения выборки:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})}, \quad (1)$$

где a_i – табличные коэффициенты, зависящие от объема выборки и уровня значимости; x_i и x_{cp} – i -е и среднее значение выборки соответственно; n – объем выборки; k – количество элементов выборки, определяемое по выражению:

$$k = \begin{cases} \frac{n}{2}, n - \text{четное;} \\ \frac{n-1}{2}, n - \text{нечетное.} \end{cases} \quad (2)$$

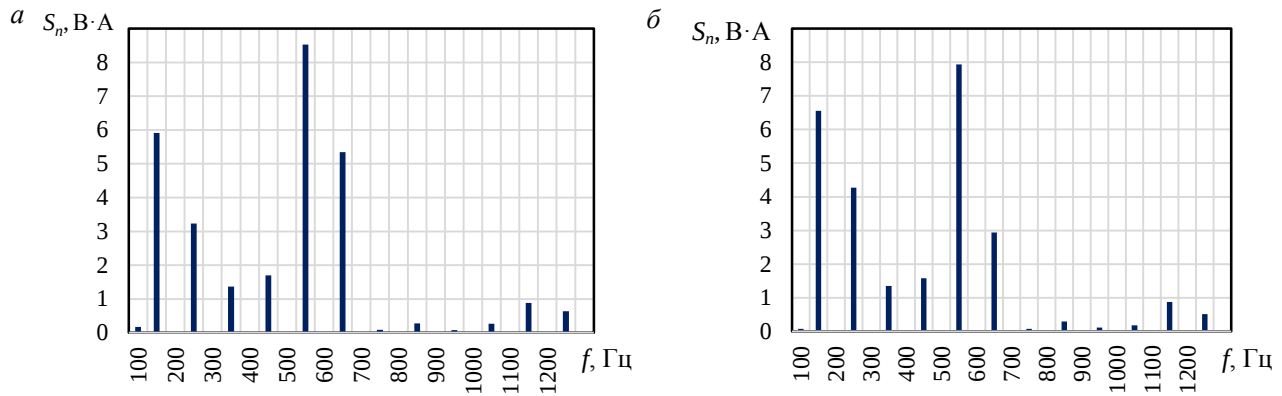


Рис. 3. Диаграммы спектра мощности вводов ТЧН: а – 1-0,4; б – 2-0,4

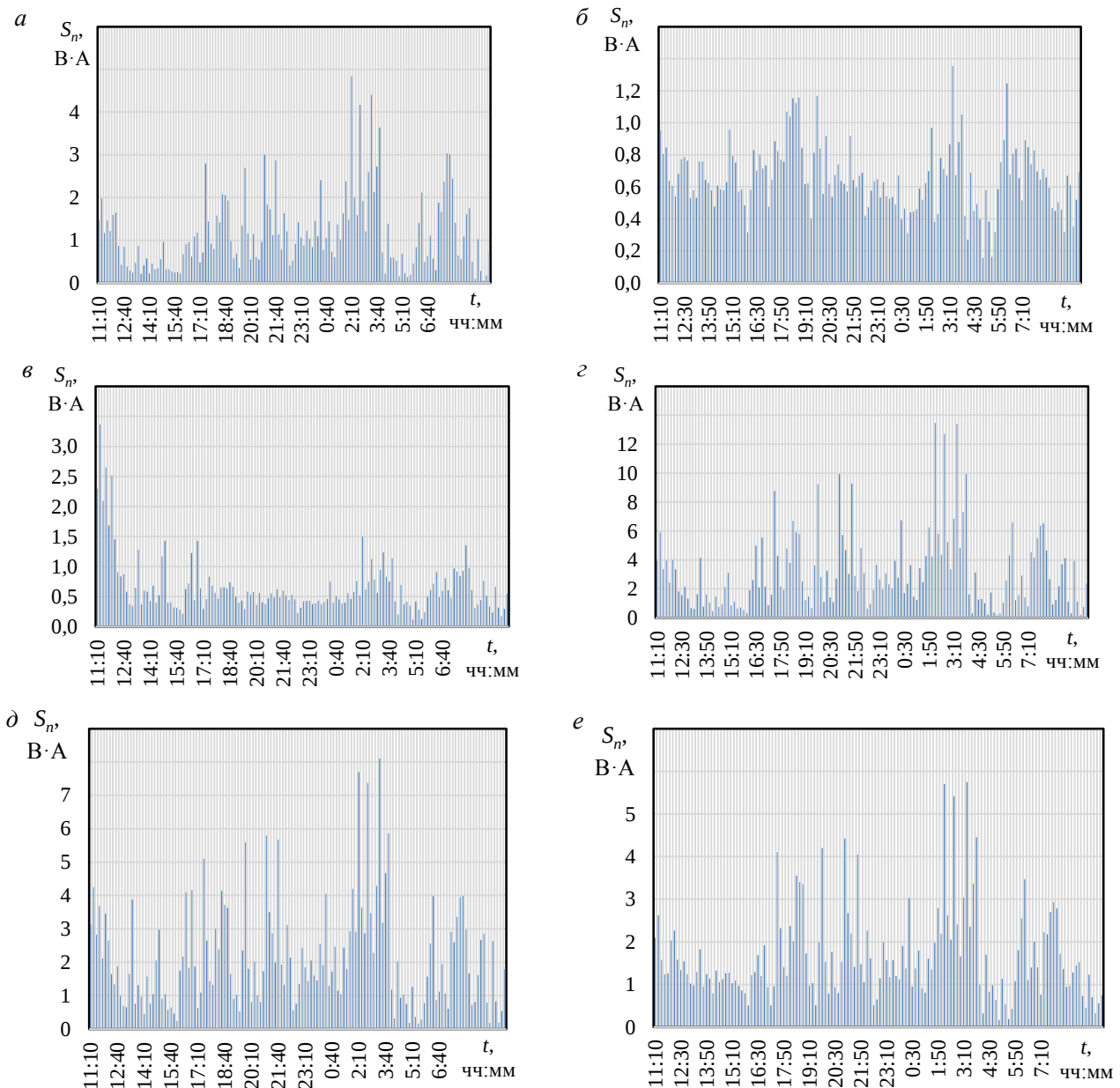


Рис. 4. Результаты регистрации мощности 11-й и 13-й гармоник на шинах 0,4 кВ:
а, в, д – фазы А, В и С ТЧН-1-0,4; б, з, е – фазы А, В и С ТЧН-2-0,4

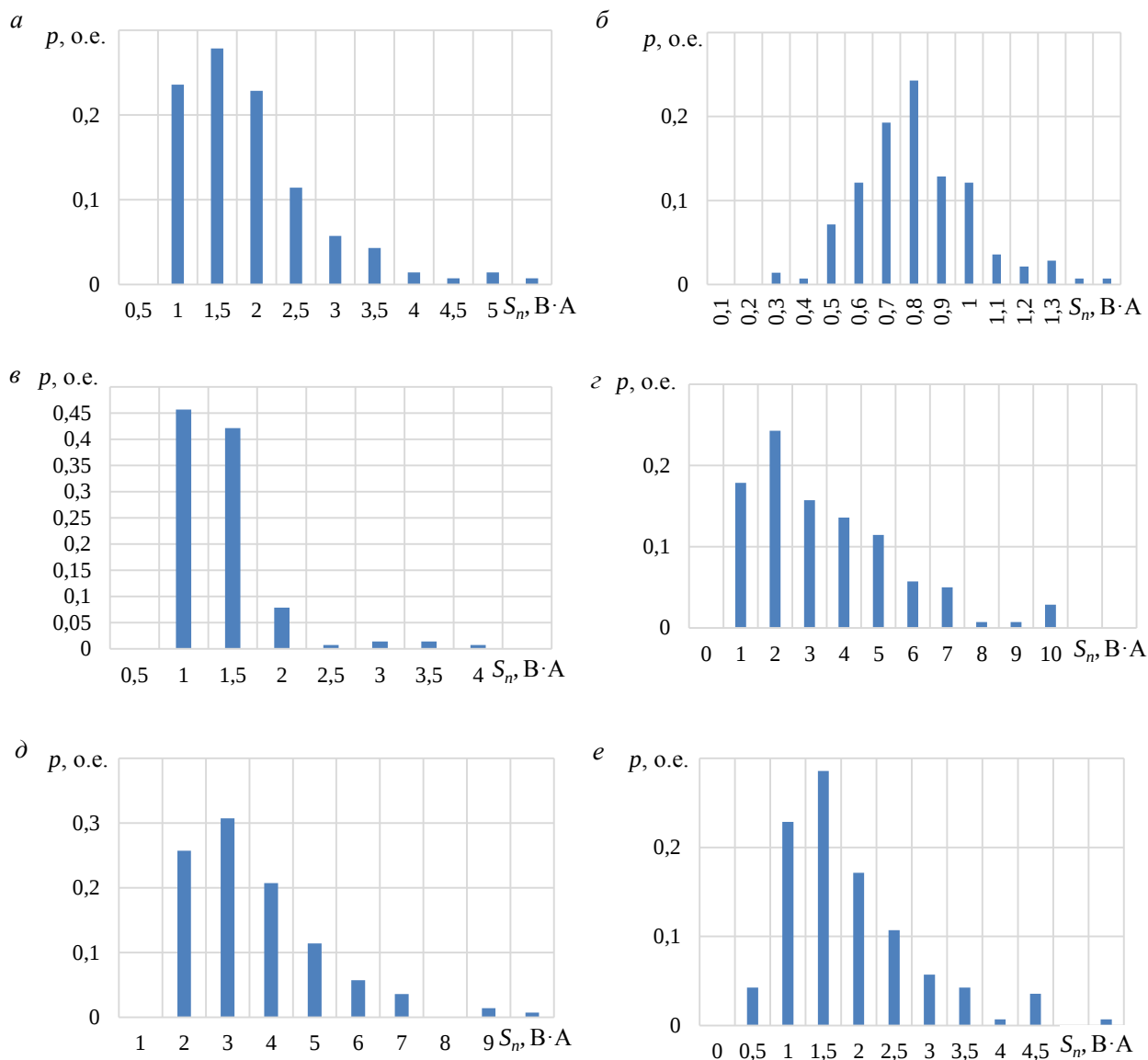


Рис. 5. Эмпирические гистограммы плотности распределения мощности 11-й и 13-й гармоник на шинах 0,4 кВ: а, в, д – фазы А, В и С ТСН-1-0,4; б, г, е – фазы А, В и С ТСН-2-0,4

Таблица 1

Сравнительная характеристика критериев

Критерий	Тип данных	Чувствительность	Подходит для малых выборок	Требуется группировка
Шапиро–Уилка	Н	В	Д	Н
χ^2 Пирсона	Л	С	Н	Д
Колмогорова–Смирнова	Н	С	Ч	Н
Крамера–Мизеса	Н	В	Д	Н
Жака–Бера	Н	С	Д	Н

Примечание – Типы данных: Н – непрерывные, Л – любые; чувствительность: В – высокая, С – средняя; подходит для малых выборок: Д – да; Н – нет, Ч – частично; требует группировки: Д – да, Н – нет.

Результаты расчета значений статистического критерия Шапиро–Уилка для мощности высших гармоник (пофазно для 11-й и 13-й гармоник) в системе

собственных нужд тяговой подстанции приведены в табл. 2. Сравнение полученных значений критерия $W_{\text{набл}}$ с табличными значениями $W_{\text{крит}}$ для уровня значимости 0,95 и объема выборки 140 позволяет сделать вывод, что гипотеза о нормальности отвергается.

Таблица 2

Результаты расчета критерия согласия Шапиро–Уилка

Параметр	11-я гармоника			13-я гармоника		
	фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
$W_{\text{набл}}$	103,229	71,808	136,344	832,297	12,710	123,285
$W_{\text{крит}}$	5,99146					

Критерий согласия Пирсона [7, 8] применяется для проверки нормальности распределения. Статистика критерия рассчитывается по формуле

$$\chi^2 = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^k m_i^2 - n, \quad (3)$$

где k – количество равновероятных интервалов;
 m – количество членов выборки в i -м интервале.

Результаты расчетов модифицированного критерия приведены в табл. 3. По результатам сравнения расчетных значений критерия с критическим гипотеза о нормальности отвергается для всех вариантов.

Таблица 3

Результаты расчета критерия согласия Пирсона

Параметр	11-я гармоника			13-я гармоника		
	фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
$\chi^2_{\text{набл}}$	175,137	139,007	180,757	27165,711	18,614	150,040
$\chi^2_{\text{крит}}$	12,5916	12,5916	12,5916	12,591587	12,5916	12,59159

Критерий Колмогорова–Смирнова используется для задачи проверки гипотезы нормальности распределения, алгоритм расчета статистики аналогичен модифицированному критерию Пирсона. По результатам расчета модифицированная статистика сравнивается с критическим значением:

$$D_n^H = D_n \left(\sqrt{n} - 0,01 + \frac{0,85}{\sqrt{n}} \right), \quad (4)$$

где D_n – максимальное отклонение теоретической функции распределения.

По результатам расчетов гипотеза о нормальности отвергается. Аналогичные результаты для рассматриваемой выборки мощности высших гармоник получены для других статистических критериев, таких, как критерии Крамера–фон Мизеса и Жака–Бера.

К одним из наиболее подходящих для описания эмпирических функций плотности вероятности мощности высших гармоник относится семейство распределений Вейбулла–Гнеденко. Распределение является двухпараметрическим: параметр k определяет вид плотности (формы) распределения, параметр λ – масштаб.

Распределение Вейбулла–Гнеденко описывается функциями распределения и плотности распределения:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}; \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}. \quad (6)$$

Определение параметров распределения Вейбулла–Гнеденко [9, 10] выполняется по алгоритму расчетов, содержащему этапы сортировки данных, расчета эмпирической функции распределения, линеаризации данных, построения регрессионной модели и интерпретации результатов. Результаты расчета параметров распределения Вейбулла–Гнеденко приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры распределения Вейбулла–Гнеденко

Параметр	11-я гармоника			13-я гармоника		
	фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
k	1,3331	1,4223	1,2163	1,4201	3,4858	1,6300
λ	1,2705	2,3695	3,3622	0,7298	0,7304	1,8660

Графики функции распределения и плотности распределения Вейбулла–Гнеденко для рассматриваемой выборки данных мощности высших гармоник практически совпадают (рис. 6).

Результаты расчетов показывают, что гипотеза о нормальности отвергается всеми рассмотренными критериями при уровне значимости 0,95. На основании проведенного анализа распределений и критериев согласия установлено, что наилучшее соответствие эмпирическим данным, полученным в ходе анализа показателей качества электроэнергии, демонстрирует распределение Вейбулла–Гнеденко. Указанное распределение не было отвергнуто, но и показало наименьшие значения статистик отклонения по критериям Колмогорова–Смирнова и Крамера–Мизеса. Распределение Вейбулла–Гнеденко признано наиболее подходящей моделью для описания мощности высших гармоник, регистрируемых на тяговых подстанциях постоянного тока.

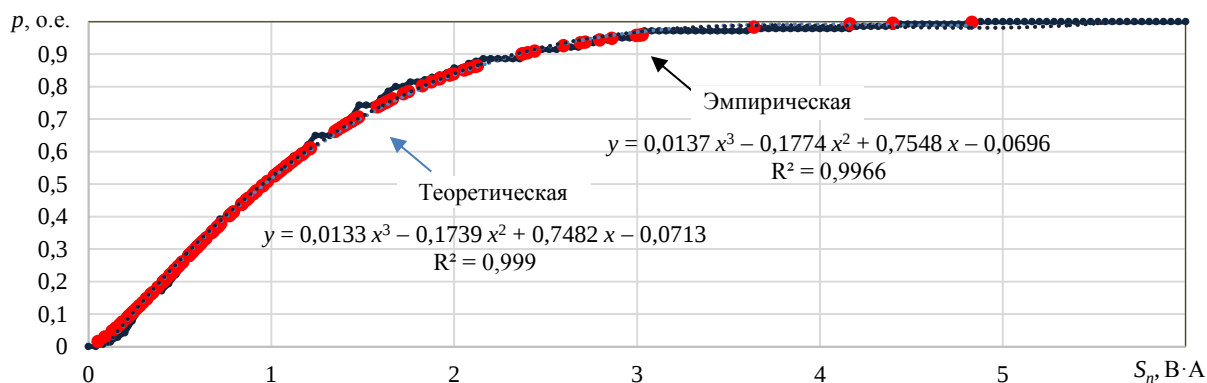


Рис. 6. Функция плотности распределения мощности высших гармоник

Средняя абсолютная ошибка для теоретического и экспериментального распределений

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{\text{экс}} - x_{\text{теор}}|}{x_{\text{теор}}}, \quad (7)$$

где $x_{\text{экс}}$ и $x_{\text{теор}}$ – экспериментальные и теоретические значения плотности распределения.

Полученные значения абсолютной ошибки для мощности 11-й и 13-й гармоник для экспериментального и теоретического распределений находятся в диапазоне 2–3 %, что показывает удовлетворительное приближение с помощью распределения Вейбулла–Гнеденко.

Таким образом, анализ выборок мощности высших гармоник выявил следующее:

- по результатам регистрации показателей качества электроэнергии мощность высших гармоник (11-й и 13-й) на шинах собственных нужд тяговых подстанций не превышает уровень 10 Вт;

- распределение мощности высших гармоник на тяговых подстанциях с двенадцатипульсовыми преобразователями (11-я и 13-я гармоники) наиболее близко описывается распределением Вейбулла–Гнеденко, гипотеза о нормальности отвергается с помощью ряда статистических критериев;

- кумулятивная эмпирическая функция плотности вероятности хорошо описывается теоретической функцией Вейбулла–Гнеденко, абсолютная ошибка находится в диапазоне 2–3 %.

Оценка характера распределения и статического описания мощности высших гармоник позволяет перейти к оценке эффективности электрических пассивных и активных фильтров для применения на тяговых подстанциях с целью обеспечения показателей качества электроэнергии для нетяговых и других потребителей, подключенных к шинам среднего и низшего напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шевлюгин М.В., Голицына А.Е. Повышение качества электрической энергии при электроснабжении собственных нужд совмещенной тяговой подстанции метрополитена // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 5. С. 37–41.
2. Применение распределенной генерации для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог на горных территориях / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, В.В. Кижин // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 3(59). С. 59–65. EDN: OTDYVT. doi:10.18324/2077-5415-2023-3-59-65
3. Павлова Р.В., Незевак В.Л. Оценка гармонических искажений тока и напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока // Наука и образование: достижения и перспективы : материалы IX международной научно-практической конференции, Саратов, 19 декабря 2024 г. Самара–Саратов : ООО «Амирит»; Приволжский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 85–92.
4. Анализ показателей качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / А.А. Ковалев, Т.Т. Шаюхов, С.А. Чебаков, А.Т. Шарапов // Транспорт Урала. 2020. № 4(67). С. 86–90. doi:10.20291/1815-9400-2020-4-86-90
5. Незевак В. Л., Скоков Р.Б., Павлова Р.В. Применение имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока для оценки качества электроэнергии // Известия Транссиба. 2025. № 1(61). С. 36–48.
6. Гателюк О.В., Незевак В.Л., Эрбес В.В. Анализ данных измерений в системе тягового электроснабжения постоянного тока с неуправляемыми выпрямителями // Электротехника. 2018. № 12. С. 66–72.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва : Физматлит, 2006. 816 с.
8. Малугин В.А. Математическая статистика : учебник для вузов. Москва : Юрайт, 2025. 218 с. (Высшее образование). URL : <https://urait.ru/bcode/563990> (дата обращения: 12.05.2025).
9. Полосин В.Г., Тertyчная С.В. Анализ результатов измерений объемной активности радона с помощью распределения Вейбулла–Гнеденко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2009. № 1 (9). С. 127–133.
10. Максименко А.Н., Богомолов Ю.В.. Теория вероятностей : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Ярославль : ЯрГУ, 2019. 128 с.

REFERENCES

1. Shevlyugin M.V., Golicyna A.E. Povyshenie kachestva elektricheskoy energii pri elektrosnabzhenii sobstvennykh nuzhd sovmeshchennoy tyagovoy podstancii metropolitena [Improving the quality of electric power when supplying it for auxiliary power requirements of a combined traction substation of subway] // Energobezopasnost' i energosberezhenie. 2022. № 5. S. 37–41.
2. Primenenie raspredelennoi generacii dlya uluchsheniya kachestva elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya zheleznykh dorog na gornyykh territoriyakh [Use of distributed generation for improving the quality of electric power in power supply systems of railroads in mountain areas] / Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov, V.V. Kizhin // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2023. № 3(59). S. 59–65. EDN: OTDYVT. doi:10.18324/2077-5415-2023-3-59-65
3. Pavlova R.V., Nezevak V.L. Otsenka garmonicheskikh iskazhenij toka i napryazheniya na shinakh tyagovykh podstancij postoyannogo toka [Evaluation of harmonic distortions of current and voltage on buses of DC traction substations] // Nauka i obrazovanie: dostizheniya i perspektivy : Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saratov, 19 dekabrya 2024 g. Samara–Saratov : ООО «Amirity»; Privolzhskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2024. S. 85–92.

4. Analiz pokazatelej kachestva elektroenergii v setyah netyagovykh potrebitelej zhe-leznodorozhnogo transporta [Analysis of electric power quality indicators in networks of non-traction consumers at railway transport] / A.A. Kovalev, T.T. Shayuhov, S.A. Chebakov, A.T. Sharapov // Transport Urala. 2020. № 4(67). S. 86–90. doi: 10.20291/1815-9400-2020-4-86-90.
5. Nezevak V.L., Skokov R.B., Pavlova R.V. Primenenie imitatsionnoj modeli tyagovoj podstantsii postoyannogo toka dlya otsenki kachestva elektroenergii [Use of simulation model of a DC traction substation for electric power quality evaluation] // Izvestiya Transsiba. 2025. № 1(61). S. 36–48.
6. Gatelyuk O.V., Nezevak V.L., Erbes V.V. Analiz dannykh izmerenij v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka s neupravlyaemymi vypryamitelyami [Measurements' data analysis in a system of DC traction power supply with uncontrolled rectifiers] // Elektrotehnika. 2018. № 12. S. 66–72.
7. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers] Moskva : Fizmatlit, 2006. 816 s.
8. Malugin V.A. Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics] : uchebnik dlya vuzov. Moskva : Yurajt, 2025. 218 s. (Vysshee obrazovanie). URL : <https://urait.ru/bcode/563990> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
9. Polosin V.G., Tertychnaya S.V. Analiz rezul'tatov izmerenij ob"emnoj aktivnosti radona s po-moshch'yu raspredeleniya Vejbul'a-Gnedenko [Analysis of results of radon's volumetric activity measurements with the help of Weibull-Gnedenko distribution] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Fizikomatematicheskie nauki. 2009. № 1 (9). S. 127–133.
10. Maksimenko A.N., Bogomolov Yu.V. Teoriya veroyatnostej [Probability theory] : uchebnoe posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Yaroslavl' : YarGU, 2019. 128 s.

Информация об авторах

О.В. Гателюк – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», доцент кафедры «Информационная безопасность»;

В.Л. Незевак – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»;

Р.В. Павлова – студент.

Information about the authors

O.V. Gatelyuk – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Associate Professor of the Department of Information Security;

V.L. Nezevak – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Electric Power Supply of Railway Transport»;

R.V. Pavlova – student.

Статья поступила в редакцию 01.06.2025; одобрена после рецензирования 06.09.2025; принята к публикации 06.09.2025.

The article was submitted: 01.06.2025; approved after reviewing: 06.09.2025; accepted for publication: 06.09.2025.

Научная статья
УДК 624.131.431.3
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-81-86

УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЯ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА ПУТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Жигальцова Анна Сергеевна¹, Кудрявцев Сергей Анатольевич²,
Цвигунов Дмитрий Геннадьевич³, Шестаков Илья Викторович⁴

^{1, 2, 3, 4} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ zhigaltsova.anna@bk.ru

^{2, 3, 4} kudr@festu.khv.ru

Аннотация. Представлен анализ процесса увеличения провозной и пропускной способности участка Угловая–Лозовый Дальневосточной железной дороги после введения тоннельного обхода лимитирующего перегона Шкотово–Смоляниново. Рассмотрены конструктивные мероприятия и инновационные методы, способствующие увеличению эксплуатационной надежности верхнего и нижнего строения железнодорожного пути путем повышения упругости подрельсового основания.

Ключевые слова: лимитирующий участок, пропускная и провозная способность, тяжеловесное движение, подбалластные виброрамы, вибронагрузка, осадка железнодорожного пути

Original article

INCREASING THE RELIABILITY OF THE FOUNDATION OF THE RECONSTRUCTED SECTION OF THE FAR EASTERN RAILWAY

Zhigaltsova Anna S.¹, Kudryavtsev Sergey A.², Tsvigunov Dmitry G.³, Shestakov Ilya V.⁴

^{1, 2, 3, 4} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ zhigaltsova.anna@bk.ru

^{2, 3, 4} kudr@festu.khv.ru

Abstract. The article presents an analysis of the process of increasing the carrying and throughput capacity of the Ugolnaya-Lozovy section of the Far Eastern Railway after the introduction of the tunnel bypass of the Shkotovo-Smolyaninovo limiting stage. Constructive measures and innovative methods are considered that contribute to increasing the operational reliability of the upper and lower structures of the railway track by increasing the elasticity of the under-rail base.

Keywords: limiting section, throughput and carrying capacity, heavy-haul traffic, sub-ballast vibrating mats, vibration loading, track settlement

Введение

Эффективное функционирование железнодорожного транспорта играет исключительную роль в решении задач, поставленных правительством Российской Федерации в вопросе увеличения объемов перевозок, связанных с переориентацией экономических связей в направлении азиатских рынков. Рациональная реализация транспортного потенциала, влияющая на процессы глобализации и формирование новых зон влияния, установление долгосрочных экономических связей с зарубежными партнерами на границе Восточного полигона страны, позволит получить положительный эффект от участия в международных перевозках и создаст новые инструменты воздействия России на мировые экономические процессы.

Одним из ключевых направлений инвестиционной деятельности ОАО «РЖД» последних лет является снятие барьерных ограничений на железнодорожном пути на Транссибирской железнодорожной магистрали в направлении портов Дальнего Востока, что потенциально приведет к увеличению про-

пускной способности железнодорожной сети до 200 млн т в год [1].

Разработан комплекс технических и организационно-технологических мероприятий по усилению конструкции железнодорожного пути, способствующих реализации государственных задач в области провозной и пропускной способности железнодорожного транспорта в Дальневосточном регионе. Достигнутые на данном этапе конструктивные мероприятия создания качественного железнодорожного пути эффективны и потенциальны для дальнейшего развития и представлены в статье.

Обзор перспективы освоения железнодорожных перевозок на Дальнем Востоке, инструменты устранения барьерных ограничений

Согласно статистическим данным за последние 10 лет на Дальневосточной железной дороге (ДВОСТЖД) достигнут рост перевозок грузов по железнодорожному пути на 42 % в транзитном (следующем с других железных дорог) и местном (внутри ДВОСТЖД) сообщениях на 64,8 млн т.

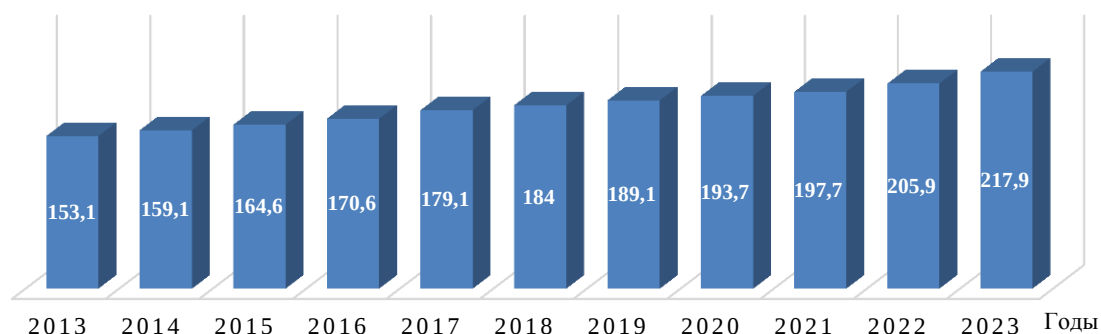


Рис. 1. Объем перевозок грузов ДВОСТЖД в прямом и местном сообщении, млн т

Согласно [1] одно из ключевых направлений инвестиционной деятельности компании-перевозчика ОАО «РЖД» последних лет – снятие инфраструктурных ограничений на Транссибирской железнодорожной магистрали в направлении портов Дальнего Востока.

В ходе работы изучено одно из ключевых направлений реконструкции Восточного участка – строительство тоннеля на подходе к узлу Находка. Участок железнодорожного пути между станциями Шкотово и Красноармейский, расположенный в Приморском крае, является важным составным элементом логистической цепочки во внешнеторговых связях дальневосточных портов со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, значимость которых для экономики России кратно возрастает в последние годы. Рельеф данного участка затруднен наличием переломов продольного профиля, затяжными подъемами и спусками, в сочетании с кривыми малого радиуса. В данных условиях для организации движения поездов необходимо применение дополнительной меры – использования второго локомотива подталкивания, размещаемого в хвосте состава для всех поездов, масса которых превышает 3400 т [2].

В рамках реализации инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей» [3, 4], в конце 2024 г. завершился этап строительства двухпутного обхода от станции Смоляниново до станции Шкотово, цель которого – исключение кривых малого радиуса (от 195 м) и продольных уклонов с 25,0 ‰ до 9,0 ‰, общей протяженностью (по длине укладываемых путей) 16,232 км. С учетом особенностей рельефа местности, для сглаживания продольного профиля трассы потребовалось строительство четырех мостов и двух однопутных тоннелей нечетного и четного направлений длиной 1450 и 1420 м соответственно.

Развитие тяжеловесного движения ведет к большему износу эксплуатируемого железнодорожного пути за счет вибродинамического воздействия, увеличения амплитуды вибраций от проходящих поездов, вследствие которого риск возникновения опасных дефектов в конструкции пути и стрелочных переводов значительно возрастает. Инновационным решением, направленным на увеличение показателей надежности к динамическим нагрузкам, обеспечению бесперебойной работы конструкции пути, является применение современных подбалластных вибрматов в конструкции пути построенных тоннелей. Их эффективность обеспечивает сохранение эксплуатационной надежности всей системы – от подвижного состава до нижнего строения пути, путем повышения упругости подрельсового основания. Данное решение позволяет решить задачу увеличения долговечности срока службы составных частей строения железнодорожного пути [5].

В отличие от опыта зарубежных стран, применение подбалластных матов в России только набирает обороты, и в настоящее время они не используются широко.

Подбалластные вибрматы представляют собой эластичные прокладки, устанавливаемые под балластным слоем, изготовленные из натурального каучука (эластомера, обладающего эластичностью, водонепроницаемостью и электроизоляционными свойствами), переработанной резины или пенополиуретана (сверхлегкого пластического, пористого материала с закрытой структурой ячеек).

Преимущества применения вибрматов представлены на рис. 2.

Измерение параметров вибрационной нагрузки и конструкции верхнего строения пути в тоннелях на перегоне Шкотово–Смоляниново представлены на рис. 3, 4.

УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЯ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА ПУТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Технические параметры	Эксплуатационные параметры
Снижение интенсивности износа и осадки пути	Снижение вибрации и шума
Сокращение балластных деформаций	Увеличение интервалов технического обслуживания
Улучшенный контакт «колесо–рельс»	Увеличение продолжительности срока эксплуатации
Повышение устойчивости пути	Снижение эксплуатационных затрат на обслуживание
Снижение динамической нагрузки на искусственные сооружения	

Рис. 2. Преимущества применения виброматов

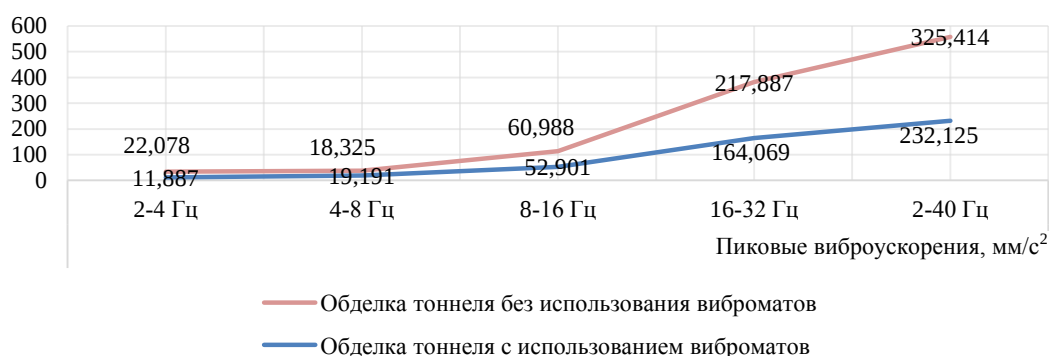


Рис. 3. Измерение виброускорения колебаний в частотном диапазоне (обделка тоннеля)

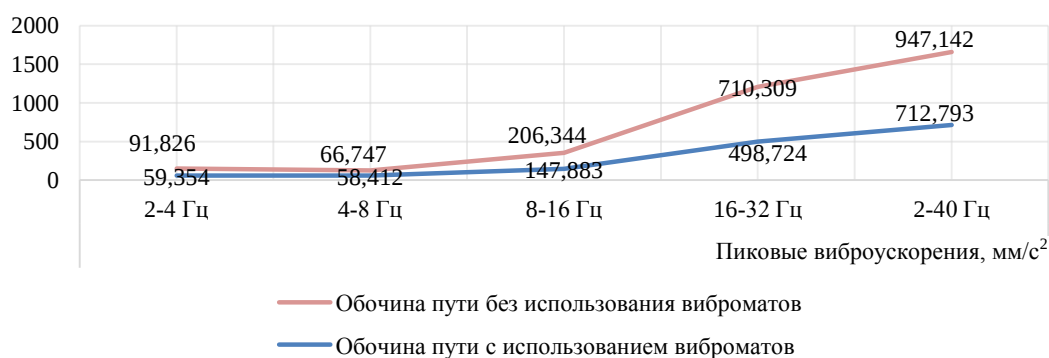


Рис. 4. Измерение виброускорения колебаний в частотном диапазоне (обочина пути)

Согласно [6] подбалластные маты предназначены для снижения и оптимизации статического и динамического модулей упругости пути (звеньевого и бесстыкового железнодорожного пути любой категории) в целях снижения динамической нагрузки, передаваемой от подвижного состава на основную площадку земляного полотна и другие объекты инфраструктуры, в том числе для снижения вторичного и отраженного шума на искусственных сооружениях, внутри объектов инфраструктуры, в близлежащих зданиях и сооружениях.

Помимо этого, подбалластные маты применяют для устройства участков переменной жесткости, в том числе в зоне примыкания к искусственному сооружению, между различными конструкциями верхнего строения пути (например, типовой и виброзащитной), а также в иных случаях, обоснованных расчетом. В ходе проведенного эксперимента установлено, что изменение виброускорения достигнуто, и в ходе применения виброматов на всех частотах колебаний оно находится в диапазоне от 2 до 40 Гц (рис. 3, 4).

Зарубежный опыт применения подбалластных матов в течение года также подтверждает эффективность их использования в целях снижения уровня упругой осадки пути на 40 % в сравнении с участком пути без применения матов, которая остается постоянной в течение шести месяцев эксплуатации [8] (рис. 5).

Технологическая цель данного капитального проекта – увеличение пропускной и провозной способности железнодорожной инфраструктуры, уменьшение участка подталкивания поездов и, как следствие, сокращение плеча оборота подталкивающих локомотивов, затрудняющих движение нечетного поездопотока.

Изменения в движении поездов с подталкивающими локомотивами и их возвращение схематично показаны на рис. 5.

Прежняя технология предписывала направление локомотивов на удлиненное плечо со станции Смоляниново на станцию Шкотово для подталкивания груженых составов через горно-перевальный участок до станции Красноармейский и далее обратный

ход на станцию Шкотово. Открытие движения поездов по вновь построенному тоннелю на перегоне Шкотово–Смоляниново позволило сократить участок подталкивания на 29,2 км (в настоящее время данная работа начинается со станции Новонежино). Аналитические расчеты показывают, что в результате реализации проекта удалось сократить потребный парк подталкивающих локомотивов с 20 до 12 единиц, с возможностью задействования 8 дополнительных локомотивов в качестве тяговых единиц под грузовые поезда на данном участке. Данное решение выявило резервы пропускной способности за счет сокращения оборота подталкивающих локомотивов, затрудняющих пропуск следующего состава в заданном направлении.

Сравнительный анализ качественных показателей работы диспетчерского участка Угловая–Лозовый после реконструкции за январь 2025 г. к аналогичному периоду предыдущего года представлен в таблице и на рис. 7, 8.

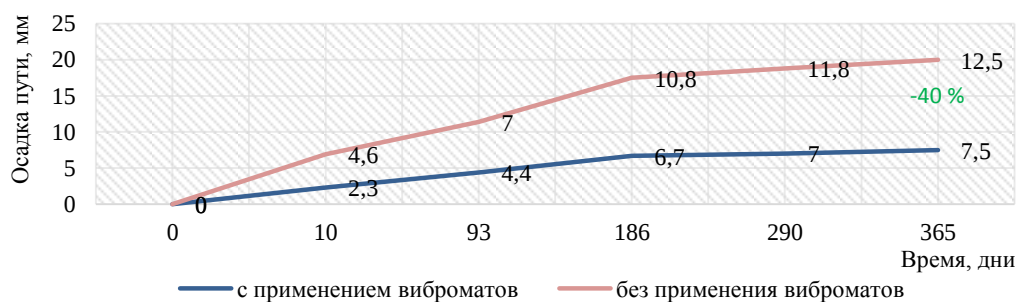


Рис. 5. Измерение средней осадки пути в течение года

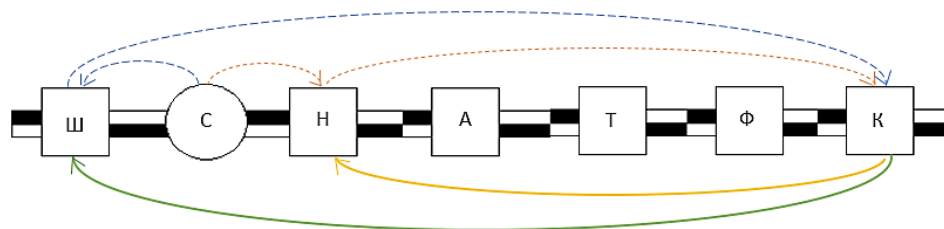


Рис. 6. Схема движения подталкивающих локомотивов: — — — — — ➔ – следование подталкивающего локомотива до строительства тоннелей; — — — — — ➔ – следование подталкивающего локомотива после строительства тоннелей; —————➔ – возврат подталкивающего локомотива до строительства тоннелей; —————➔ – возврат подталкивающего локомотива после строительства тоннелей; □ – промежуточная станция; ○ – техническая станция с основным депо; С, Н, А, Т, Ф, К – названия станций (Шкотова, Смоляниново, Новонежино, Анисимовка, игровой, Фридман, Красноармейский)

Таблица

Анализ изменения показателей работы участка Угловая–Лозовый

Показатель	Январь 2024 г.	Январь 2025 г.	Динамика
Средний вес поезда (общий), т	4060	4199	+139 т/+3,3 %
Средний вес поезда (четное направление), т	5199	6049	+850 т/+14,1 %
Средний вес поезда (нечетное направление), т	2180	2404	+224 т/+9,3 %
Участковая скорость (общая), км/ч	20,1	30	+8,9 км/ч/29,7 %
Участковая скорость (в четном направлении), км/ч	26,4	40	13,6 км/ч/+34 %
Участковая скорость (в нечетном направлении), км/ч	18,6	23,6	+5 км/ч/+21,2 %

УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЯ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА ПУТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

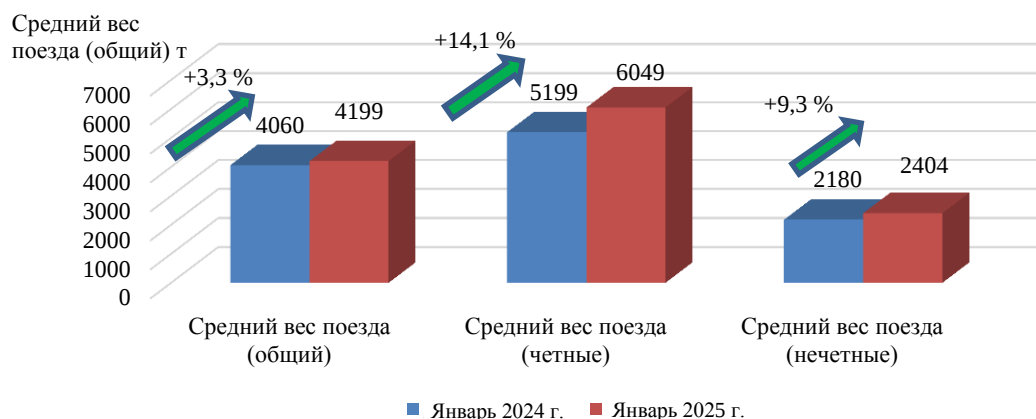


Рис. 7. Диаграмма изменения показателя «Средний вес поезда»

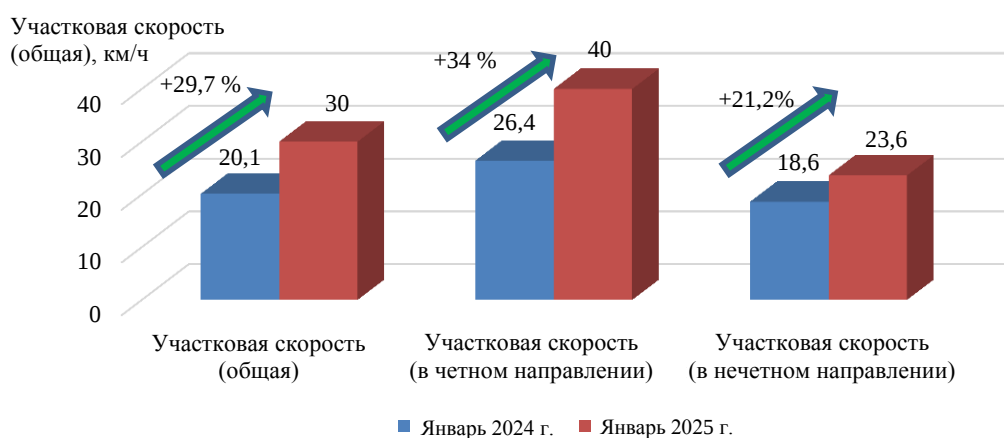


Рис. 8. Диаграмма изменения показателя «Участковая скорость»

Проведенный в ходе исследования анализ говорит о положительной динамике изменения качественных показателей железнодорожного пути и эксплуатационной работы диспетчерского участка после его реконструкции [9–12].

Заключение

Внедрение современных технических средств, направленных на продление срока эксплуатации

верхнего строения пути, ведущему к повышению надежности, увеличению показателей устойчивости к динамическим нагрузкам, связано с возрастающим потенциалом объема грузовых перевозок. Применение подбалластных виброматов на практике показало положительный эффект в вопросе снижения вибрагрузки и уменьшения уровня осадки пути.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877р.
2. Об установлении норм массы и длины пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых структурными подразделениями дирекции тяги : распоряжение ОАО «РЖД» от 10 апреля 2024 г. № ЦТ-51.
3. Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей : распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 октября 2014 г. № 2116-р.
4. Организация движения поездов на участках Восточного полигона на период 2025 г. // АО «ИЭРТ». П. 23.1.
5. Патроняк А.В., Чаплин И.В., Ефимов С.В. Применение подбалластных виброматов на мостовых сооружениях // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2023. № 4. С. 43–53.
6. ГОСТ Р 70258–2022. Маты подбалластные для виброизоляции конструкции верхнего строения пути. 2022. 16 с.
7. Кудрявцев С.А., Берестяной Ю.Б., Вальцева Т.Ю. Усиление пути для пропуска тяжеловесных поездов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 1. С. 27–29.
8. Pospischilab, F., Vonbuna, D.-I.S., Loyab, H. Sustainable superstructure with Under Sleeper Pads. 2018.
9. Embankment on permafrost eastern polygon of Baikal-Amur mainline / S.A. Kudryavtsev, E.D. Goncharova, Z.I. Kotenko, D.O. Grigoriev // Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geocology (TGG-2017). 2017. С. 774–782. (Procedia Engineering).

10. Kudryavtsev S., Borisova A. The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03040.
11. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «TERMOGROUND» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
12. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. The account of frost heave and thawing processes when designing road embankments in cold regions // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Singapore, 2020. Pp. 19–24. Vol. 49. (Lecture Notes in Civil Engineering).

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030] : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877r.
2. Ob ustanovlenii norm massy i dliny passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh, obsluzhivaemykh strukturnymi podrazdeleniyami direktcii tyagi [«On establishing standards for the weight and length of passenger and freight trains on sections served by structural divisions of the Traction Directorate»] : rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 10 aprelya 2024 g. № TsT-51.
3. Modernizatsiya zheleznodorozhnoj infrastruktury Baikalo-Amurskoj i Transsibirskoj zheleznodorozhnykh magistralей s razvitiem propusknykh i provoznykh sposobnostej [«Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways with the development of throughput and carrying capacity»] : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 24 oktyabrya 2014 g. № 2116-r.
4. Organizatsiya dvizheniya poezdov na uchastkakh Vostochnogo poligona na period 2025 [Organization of train traffic on sections of the Eastern polygon for the period of 2025] // AO «IERT» (P. 23.1)
5. Patronymak A.V., Chaplin I.V., Efimov S.V. Primenenie podballastnykh vibromatov na mostovykh sooruzheniyakh [Application of sub-ballast vibromats on bridge structures] // Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya. 2023. № 4. S. 43–53.
6. GOST R 70258-2022. Maty podballastnye dlya vibroizolyatsii konstruksii verkhnego stroeniya puti [GOST R 70258-2022. Sub-ballast mats for vibration isolation of the construction of track structure]. 2022. 16 s.
7. Kudryavtsev S.A., Berestyaniy Yu.B., Valtseva T.Y. Usilenie puti dlya propuska tyazhelovesnykh poezdov [Reinforcement of the track for heavy trains]. Put' i putevoe khozyajstvo. 2008. № 1. S. 27–29.
8. Pospischilab F., Vonbuna D.-I.S., Loyab H. Sustainable superstructure with Under Sleeper Pads. 2018.
9. Embankment on permafrost eastern polygon of Baikal-Amur mainline / S.A. Kudryavtsev, E.D. Goncharova, Z.I. Kotenko, D.O. Grigoriev // Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017). 2017. S. 774–782. (Procedia Engineering).
10. Kudryavtsev S., Borisova A. The research of the freezing and thawing process of the foundations with the use of season and cold-producing devices. // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 03040.
11. Kudryavtsev S.A. Raschet protsessa promerzaniya i ottaivaniya po programme TERMOGROUND" [Calculation of the freezing and thawing process according to the "TERMOGROUND" program] //Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2004. № 4. S. 83.
12. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. The account of frost heave and thawing processes when designing road embankments in cold regions // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Singapore, 2020. Pp. 19–24. Vol. 49. (Lecture Notes in Civil Engineering).

Информация об авторах

А.С. Жигальцова – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения», диспетчер поездной Дальневосточной дирекции управления движением структурного подразделения Центральной дирекции управления движением филиала ОАО «РЖД»;

С.А. Кудрявцев – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;

Д.Г. Цвигунов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;

И.В. Шестаков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения».

Information about the authors

A.S. Zhigaltsova – Post-graduate Student, Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures, Dispatcher of the Train Far Eastern Directorate of Traffic Management, a Division of the Central Directorate of Traffic Management, a Branch of OAO «RZhD»;

S.A. Kudryavtsev – Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures;

D.G. Tsvigunov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures;

I.V. Shestakov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Underground Structures.

Статья поступила в редакцию 31.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.
The article was submitted: 31.03.2025; approved after reviewing: 25.04.2025; accepted for publication: 25.04.2025.

Научная статья
УДК 621.311.001.57
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-87-95

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ТРЕКЕРАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ PID И FOPID-РЕГУЛЯТОРОВ

Исса Хайдер Абдулсахиб Исса¹, Велькин Владимир Иванович², Абдали Лаит Мохаммед Абдали³,
Кувшинов Владимир Владиславович⁴, Муровский Сергей Петрович⁵, Щеклеин Сергей Евгеньевич⁶

^{1, 2, 6} Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³ Университет Куфы, Президентский университет Куфы, Наджаф, Ирак, layth_2210@mail.ru

⁴ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия, kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁵ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, murovski@inbox.ru

¹ hayderissa10@gmail.com

² v.i.velkin@urfu.ru

⁶ s.e.shcheklein@urfu.ru

Аннотация. Двухосные системы слежения за солнцем играют ключевую роль в максимизации выработки энергии фотоэлектрических установок за счёт постоянного выравнивания положения солнечных панелей с учетом слежения за солнцем в течение дня. Однако такие системы представляют собой серьёзную задачу для управления из-за нелинейной динамики, внешних возмущений и необходимости высокоточного слежения. Представлена сравнительная оценка эффективности двухосной системы слежения за солнцем: классического пропорционально-интегрально-дифференцирующего (PID) регулятора и регулятора дробного порядка (FOPID). Хотя регулятор FOPID обладает большей сложностью из-за наличия пяти параметров настройки, он обеспечивает повышенную гибкость и потенциально более высокие динамические характеристики.

Ключевые слова: двухосная система слежения за солнцем, солнечный трекер, PID-регулятор, FOPID-регулятор, управление двигателем постоянного тока, фотоэлектрический модуль

Original article

CONTROL EFFICIENCY OF DUAL-AXIS SOLAR TRACKERS USING PID AND FOPID REGULATORS

Issa Hayder A.¹, Velkin Vladimir I.², Abdali Layth M.³, Kuvshinov Vladimir V.⁴,
Murovsky Sergey P.⁵, Shcheklein Sergey E.⁶

^{1, 2, 6} Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

³ University of Kufa, Presidency University of Kufa, Najaf, Iraq, 3layth_2210@mail.ru

⁴ Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁵ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, murovski@inbox.ru

¹ hayderissa10@gmail.com

² v.i.velkin@urfu.ru

⁶ s.e.shcheklein@urfu.ru

Abstract. Dual-axis solar tracking systems are essential for optimizing photovoltaic (PV) energy yield because they continuously align the orientation of the solar panels with the position of the sun throughout the day. Such systems though, are quite difficult to control due to nonlinear dynamics, external perturbations and the necessity of fine-precision tracking. This paper presents the design, modeling, and performance evaluation of two dual-axis sun tracking controllers: a conventional proportional-integral-derivative (PID) regulator and a fractional-order (FOPID) regulator. The FOPID regulator adds complexity due to its five tuning parameters, but it offers enhanced flexibility and potential for improved dynamic performance.

Keywords: two-axis sun tracking system, solar tracker, PID-regulator, FOPID-regulator, DC motor control, photovoltaic module

Введение

Ископаемое топливо по-прежнему доминирует в мировой выработке энергии, особенно в электроэнергетике и транспортной отрасли, что способствует истощению ископаемых энергоресурсов и загрязнению окружающей среды. В отличие от него, солнечная энергия представляет собой многообещающую альтернативу благодаря своей доступ-

ности, низкому воздействию на окружающую среду, бесшумной работе и экономической эффективности в долгосрочной перспективе [1, 2]. Аравийский залив и Ирак, обладающие высокой солнечной инсоляцией, в среднем около 2000 кВт·ч/м² в год, и преимущественно ясной погодой в течение всего года, представляют идеальные условия для инвестиций в солнечную энергетику.

С целью повышения эффективности использования солнечной энергии применяются системы слежения за солнцем, которые обеспечивают перпендикулярное положение фотоэлектрических панелей (ФЭП) по отношению к солнечным лучам в течение всего дня, что значительно увеличивает выработку энергии по сравнению со стационарными установками. Эти системы делятся на одноосные и двухосные трекеры. Одноосные трекеры, перемещающие панели в одном направлении (обычно с востока на запад), являются более простыми и менее дорогими, что делает их подходящими для регионов с устойчивым солнечным освещением [3, 4]. Двухосные трекеры обеспечивают большую гибкость за счет регулировки по двум осям (азимуту и высоте), что позволяет поддерживать оптимальную ориентацию панели на солнце даже при облачной погоде или переменных условиях освещения. Выбор типа трекера зависит от конкретных факторов проекта, таких как стоимость, требования к выработке энергии, площадь участка и климатические условия. Несмотря на свои преимущества, одноосные системы имеют ограничения в отслеживании солнечного света под различными углами [5, 6]. Интеграция передовых технологий, включая датчики, искусственный интеллект и системы управления, обеспечила более надёжное и точное двухосное слежение за солнцем с применением двухосных трекеров. В настоящее время такие системы включают алгоритмы определения положения солнца, датчики освещённости, замкнутые контуры обратной связи, GPS и инклинометры для динамической корректировки ориентации панелей [7]. В результате двухосные трекеры всё чаще применяются в коммерческих солнечных установках, где критически важно максимизировать выработку электроэнергии [8, 9].

Двухосные системы слежения за солнцем широко изучаются с целью максимизации эффективности выработки фотоэлектрической энергии (ФЭ) за счёт поддержания оптимальной ориентации панелей в течение всего дня. Точные механизмы слежения требуют надёжных стратегий управления для компенсации нелинейностей и неопределённостей, связанных с окружающей средой. Ряд исследований подчёркивает важность точного слежения за солнцем для оптимизации выработки энергии, особенно в системах с приводом от двигателей постоянного тока. В работах [10, 11] представлена усовершенствованная система слежения, использующая методы искусственного интеллекта для фотоэлектрических модулей, что демонстрирует потенциал интеллектуальных алгоритмов в условиях динамичной солнечной среды. Практическая реализация и экспериментальная проверка двухосных систем слежения за солнцем рассматривались в работе [12], где клю-

чевым аспектом являлась эффективность системы и её экономическая целесообразность. Эти исследования служат основой для изучения современных решений управления, таких как пропорционально-интегральные регуляторы (PID) дробного порядка (FOPID), с целью дальнейшего повышения динамических характеристик и эффективности выработки энергии в системах со слежением за пространственным положением ФЭП. Тем не менее применение регуляторов FOPID в двухосных системах слежения за солнцем остаётся относительно малоизученным в научной литературе. В частности, существует недостаток комплексных сравнительных анализов между традиционными PID- и FOPID-регуляторами, ориентированных на ключевые параметры эффективности, такие как эффективность сбора энергии, минимизация ошибки слежения и быстродействие в реальном времени. Более того, несмотря на преимущества FOPID-регуляторов в плане производительности, их возросшая сложность может представлять трудности при практическом применении во встроённых системах с ограниченными финансовыми ресурсами – важный аспект, который часто упускается из виду в современных исследованиях. Это подчёркивает очевидный пробел и указывает на необходимость глубокого анализа компромиссов между эффективностью управления и сложностью реализации стратегий PID против FOPID в задачах слежения за солнцем.

Цель настоящего исследования: проведение сравнительного анализа работы PID- и FOPID-регуляторов в системах двухосного слежения солнечных модулей, определение их влияния на точность позиционирования и эффективность фотоэлектрического преобразования энергии.

Задачи исследования: обоснование целесообразности использования FOPID-регулятора в системах солнечного слежения благодаря его преимуществам перед классическим PID-регулятором.

Научная новизна представленной работы заключается в повышении эффективности работы фотоэлектрических панелей за счёт более точного слежения трекера за их пространственным положением, обеспечиваемого регулятором FOPID и получением более высоких энергетических характеристик, вырабатываемых солнечной установкой.

Методы исследования. Проведён сравнительный анализ модели двухосной системы слежения за солнечной энергией с использованием регуляторов FOPID и PID в среде MATLAB/Simulink. Результаты моделирования позволили подготовить физическую модель установки к практическим испытаниям, в ходе которых использовались ключевые компоненты солнечного трекера: двигатель постоянного тока, фотоэлектрическая матрица, схема широтно-импульсной модуляции (PWM) и преобразователь постоянного тока (DC–DC).

Постановка задачи. Данное исследование представляет проведение сравнительного анализа традиционного PID-регулятора и FOPID-регулятора для двухосной системы слежения за солнцем, направленной на повышение эффективности выработки фотоэлектрической энергии. Несмотря на широкое распространение PID-регуляторов благодаря их простоте, в работе подчёркиваются преимущества применения FOPID-регулятора, позволяющего достичь более высокой точности управления, быстрого динамического отклика и снижения ошибок слежения как по азимутальной, так и по высотной осям.

Материалы, использованные в исследовании

1. Механическая и электрическая структура схемы системы солнечного трекера

Месяц года, день месяца и солнечное время суток – три основных фактора, которые используются в системах управления слежением за солнцем. Эти факторы используются в качестве входных данных для определения углов наклона и ориентации в двухосных системах слежения за солнцем, а также угла ориентации в одноосных системах. В то время как месячный ввод учитывает сезонные изменения солнечной энергии, солнечная инсоляция ограничена световым днём, а именно с 8:00 до 17:00. Изменения положения солнца в течение года отражаются во входных данных по дням. Цель данной методологии – оценить, как на эффективность фотоэлектрических систем в регионе Персидского залива влияет интеграция физических технологий слежения за солнцем и алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности (MPPT).

Для отслеживания положения солнца используется двухосная система вращения, основанная на азимутальном и угле возвышения. Положение солнца определяется с использованием астрономического метода и непрерывно обновляется в течение дня с помощью цифрового сигнального процессора (DSP). DSP в реальном времени вычисляет азимут и угол возвышения солнца и использует их в качестве опорных значений для двух замкнутых систем управления. Эти системы управления, реализованные с использованием PID-регуляторов, обеспечивают точное отслеживание движения солнца, повышая способность системы к захвату максимального количества солнечной энергии [13].

Для отслеживания траектории солнца используется двухосный трекер с ФЭП. Панель вращается вокруг вертикальной оси с помощью червячной передачи в основании трекера и поворотного стола, приводимого в движение двигателем постоянного тока. Кроме того, в конструкцию поворотного стола включён упорный подшипник, способный выдерживать вес всей конструкции. Для установки панели на поворотный стол используется рама, а второй двигатель постоянного тока, соединённый с панелью через редуктор с передаточным числом 240:1, позволяет наклонять её вокруг горизонтальной оси. Для управления трекером используется астрономический алгоритм генерации угловой траектории [14]. На рис. 1 показана общая

архитектура системы солнечного трекера, подробно описывающая интеграцию ключевых компонентов, включая массив солнечных панелей, датчики определения положения, управляющий блок на основе микроконтроллера и исполнительные механизмы, отвечающие за регулировку ориентации панели. Данная схема предоставляет чёткий обзор управления процессом и аппаратных взаимосвязей, необходимых для оптимизации сбора солнечной энергии за счёт динамического слежения за положением солнца.

2. Модель двигателя постоянного тока

Двигатель постоянного тока описывается двумя основными уравнениями, с помощью которых можно построить его модель, проанализировать характеристики и реализовать управление. Первое уравнение описывает электрическое поведение двигателя, устанавливая связь между напряжением, подаваемым на клеммы двигателя, и противоэлектродвижущей силой (ЕМФ). Это можно описать следующим уравнением:

$$V = I R + L \left(\frac{di}{dt} \right) + K_{\omega} \omega, \quad (1)$$

где V – поданное напряжение; I – ток двигателя; R – электрическое сопротивление двигателя; L – индуктивность двигателя; di/dt – скорость изменения тока; K_{ω} – постоянная скорости двигателя; ω – угловая скорость двигателя.

Второе уравнение описывает механическую зависимость между крутящим моментом, скоростью двигателя и нагрузкой:

$$T = K_t I, \quad (2)$$

где T – крутящий момент двигателя; K_t – постоянная крутящего момента двигателя.

На основе этих двух уравнений, основанных на фундаментальных принципах электромагнетизма и механической динамики, можно построить модель двигателя постоянного тока.

Для более полного и реалистичного описания модели двигателя постоянного тока и анализа его поведения в реальных условиях эксплуатации путём объединения двух уравнений с учётом электрических и механических потерь, факторов трения и инерции, уравнение двигателя постоянного тока может быть представлено следующим образом:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left(V - K_g K_f \frac{d\theta}{dt} - Ri \right); \quad (3)$$

$$T = K_g K_t i. \quad (4)$$

Математические уравнения двигателей постоянного тока часто используются в программной инженерии для изучения поведения двигателей и факторов, влияющих на их работу, что позволяет разрабатывать и совершенствовать системы управления с целью повышения эффективности работы двигателей постоянного тока.

Эти уравнения используются при моделировании двигателя постоянного тока в среде «Simulink» (рис. 2).

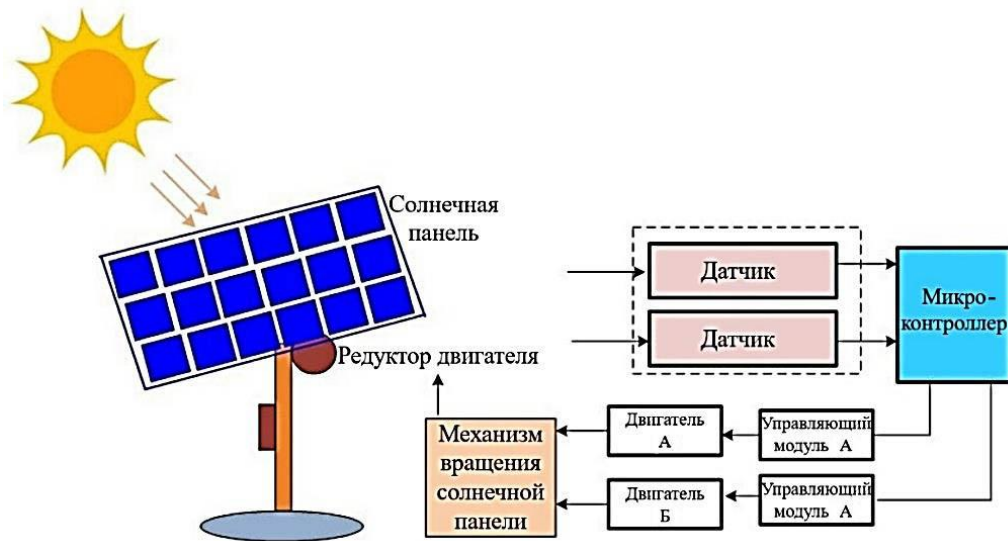


Рис. 1. Структурная схема системы солнечного трекера

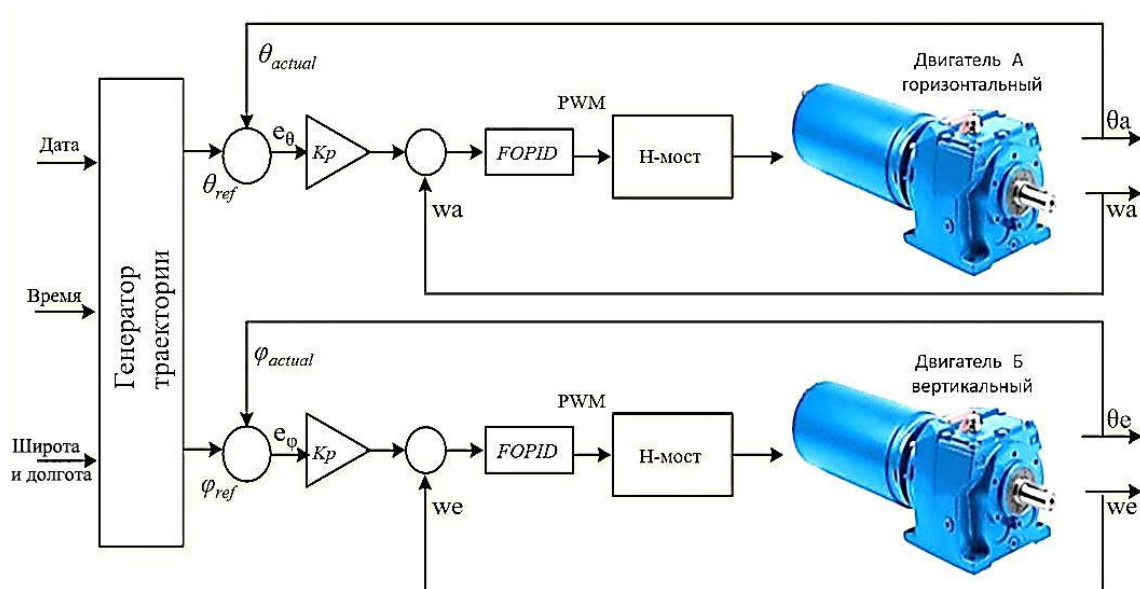


Рис. 2. Блок-схема системы управления двигателем постоянного тока

3. Моделирование фотоэлектрической панели

Двухосные системы слежения за солнцем имеют возможность поворачивать ФЭП вокруг двух осей, что позволяет им поддерживать оптимальный угол по отношению к солнцу в течение всего дня [9, 10]. Это вращательное движение представляется как математическая модель, которая может быть сформулирована более реалистично с учётом таких факторов, как трение и инерция, и принимает следующий вид:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left(T - K_d \frac{d\theta}{dt} \right). \quad (5)$$

Инерция может быть выражена уравнением

$$J = m/12 \cos^2 \beta + d^2 \sin^2 \beta + w^2. \quad (6)$$

Эти уравнения используются в программе «Simulink» для моделирования движения фотоэлектрических панелей. Табл. 1 и 2 описывают параметры двигателя постоянного тока и фотоэлектрических панелей соответственно.

Таблица 1

Параметры двигателя постоянного тока

Параметр	Единица измерения
Сопротивление R	10 Ом
Индуктивность L	10^{-5} Гн
Постоянная электродвижущей силы (ЭДС) вращения K_f	0,07
Постоянная крутящего момента K_t	0,07 Н·м/А
Передаточное отношение K_q	2000

Таблица 2

**Механические параметры
фотоэлектрической панели**

Параметр	Единица измерения
Масса M	50 кг
Ширина w	1,04 м
Длина l	1,04 м
Глубина d	0,1 м
Площадь A	м ²
Угол возвышения β	$\pi/4$ рад
Коэффициент демпфирования K_d	5 Н·м/рад/с
Инерция J	кг·м ²

Эти модели были широко проверены в предыдущих исследованиях авторов и подходят для разработки контроллеров на основе моделирования. Однако для полноты исследования и дальнейшего совершенствования планируется провести экспериментальную валидацию этих моделей с использованием аппаратного обеспечения в реальном времени на этапе данного исследования.

4. Уравнение положения Солнца (для двухосного слежения)

Моделирование систем слежения за Солнцем требует эффективного метода определения положения Солнца, поскольку основная цель таких систем заключается в том, чтобы отслеживать движение Солнца и обеспечивать идеальное выравнивание солнечных панелей по отношению к нему.

Углы положения Солнца могут быть рассчитаны с использованием следующих формул:

$$\theta_{alt}(t) = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H); \quad (7)$$

$$\theta_{az}(t) = \sin^{-1} \left(\frac{\cos \delta \cos H}{\cos \theta_{alt}} \right), \quad (8)$$

где $\theta_{alt}(t)$ – угол солнца над горизонтом; $\theta_{az}(t)$ – солнечный азимутальный угол; φ – широта местности; H – часовой угол (определяется временем суток относительно солнечного полудня).

Система управления солнечным трекером

На рис. 2 приведена подробная блочная схема системы управления двухосным солнечным трекером. Структура управления интегрирует контуры управления азимутом и углом возвышения, при этом входными переменными являются опорные значения положения солнца θ_{ref} , φ_{ref} , полученные с помощью алгоритма определения положения солнца, и сигналы обратной связи θ_{actual} , φ_{actual} от датчиков положения. Структура управления включает в себя контуры управления по азимуту и углу возвышения, при этом входными переменными являются опорные значения положения Солнца θ_{ref} , φ_{ref} , полученные с помощью алгоритма определения положения Солнца, а также сигналы обратной связи θ_{actual} , φ_{actual} от датчиков положения.

Сигналы ошибки e_θ и e_φ вычисляются как разность между опорными и фактическими положениями. Эти ошибки подаются на вход либо традиционного PID-регулятора, либо регулятора дробного порядка (FOPID), который вычисляет соответствующие управляющие воздействия. Регуляторы формируют сигналы широтно-импульсной модуляции (PWM), которые передаются на управляющие входы двигателей постоянного тока, отвечающие за перемещение панели. Динамика двигателей постоянного тока и редукторные механизмы преобразуют эти сигналы в механическое движение по осям азимута и возвышения. Система также включает обратную связь от датчиков для обеспечения корректировки в реальном времени и точного выравнивания фотоэлектрической панели по положению Солнца.

Цель использования регуляторов дробного порядка (FOPID) заключается в их преимуществах по сравнению с традиционными PID-регуляторами. Введение дробных порядков в интегральную и дифференциальную составляющие FOPID-регулятора на основе исчисления дробного порядка придаёт большую гибкость в проектировании систем управления, что обеспечивает более высокую точность при реальных операциях регулирования. Это, в свою очередь, позволяет системам слежения за солнцем поддерживать высокую точность позиционирования, удерживая солнечные панели под оптимальным углом к солнцу на протяжении всего дня, что способствует максимальному поглощению солнечного излучения и повышает эффективность вырабатываемой энергии. Кроме того, регуляторы FOPID обладают способностью эффективно реагировать на резкие изменения погодных условий и кратковременные колебания солнечного излучения, ветра, температуры и вибраций, что позволяет устранить ошибки, обеспечивая плавность и быстроту стабилизации системы слежения за солнцем для фотоэлектрической панели. Эти характеристики FOPID-регулятора в сочетании с высокой эффективностью двигателя постоянного тока обеспечивают надёжную и высокоэффективную систему слежения за движением Солнца, способствующую увеличению выработки энергии солнечными панелями [12, 14].

В данном исследовании в системах слежения за солнцем предлагается использовать регуляторы дробного порядка (FOPID) с целью повышения эффективности захвата солнечной энергии. Общая форма FOPID-регулятора выражается следующим образом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(T) dT + K_d \frac{d^\lambda e(t)}{dt^\lambda}, \quad (9)$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал (например, напряжение на двигателе или коэффициент заполнения PWM); $e(t) = r(t) - y(t)$ ошибка между опорным значением $r(t)$ (желаемым положением солнечной панели)

и измеренным выходом $y(t)$ (текущим положением панели); K_p , K_i и K_d – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев соответственно; λ и μ – порядки дробного дифференцирования и интегрирования соответственно.

Дробная производная и интеграл

Производная дробного порядка функции $f(t)$ определяется следующим образом:

$$D^\mu f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\mu)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{f(T)}{(t-T)^\mu} dT, \quad (10)$$

где D^μ – производная дробного порядка μ ; Γ – гамма-функция, которая обобщает факториал на нецелые значения.

Аналогично, интеграл дробного порядка определяется следующим образом:

$$I^\mu f(t) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \int_0^t \frac{f(T)}{(t-T)^{1-\mu}} dT. \quad (11)$$

Ошибка слежения $e(t)$ чётко определяется как разность между опорной траекторией $r(t)$ (например, положением Солнца или требуемым углом солнечного модуля) и фактическим положением трекера $y(t)$:

$$e(t) = r(t) - y(t). \quad (12)$$

Для максимизации захвата энергии ошибка $e(t)$ должна быть минимизирована.

Эффективность преобразования солнечной энергии

Эффективность преобразования солнечной энергии можно определить как количество солнечной радиации, поглощаемой фотоэлектрической панелью, и представить следующим математическим выражением:

$$P_{capture}(t) = \eta A G(t) \cos(\theta_{inc}(t)), \quad (13)$$

где $G(t)$ – суммарная энергия, захваченная солнечной панелью, которая является функцией солнечной радиации; A – площадь панели; η – коэффициент эффективности солнечной панели; $\theta_{inc}(t)$ – угол между направлением падения солнечных лучей и нормалью (перпендикуляром) к плоскости поверхности панели, который зависит от положения трекера; $G(t)$ – солнечная радиация, которая изменяется во времени и в зависимости от погодных условий.

Для максимизации $P_{capture}(t)$ необходимо минимизировать угол падения $\theta_{inc}(t)$, что достигается за счёт точного слежения, обеспечиваемого регулятором FOPID. Регулятор FOPID имеет два дополнительных параметра (λ , μ), которые обеспечивают высокую гибкость и точность в минимизации

ошибки. При правильной настройке параметров K_p , K_i , K_d , λ , μ регулятора FOPID достигается минимизация ошибки слежения $e(t)$, благодаря чему ориентация фотоэлектрической панели становится идентичной траектории движения Солнца. Это гарантирует минимизацию ошибки в $\theta_{inc}(t)$ и максимизацию эффективности выработки энергии. Можно утверждать, что регулятор FOPID обеспечит системе слежения за солнцем более точный и плавный отклик, тем самым улучшая работу всей системы. Математическая модель регулятора FOPID может быть представлена уравнением (14):

$$C(s) = K \left(1 + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \right), \quad (14)$$

где λ и μ – порядки дробного исчисления, являющиеся действительными числами и удовлетворяющие условиям $0 < \lambda < 2$ и $0 < \mu < 2$ соответственно; K_p , K_i и K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно. Коэффициент K_p показывает, насколько сильно регулятор реагирует на текущую ошибку системы. Его можно выбрать разными способами: с помощью расчетов, метода Зиглера–Николса или экспериментально. В этом исследовании K_p был определён с помощью моделирования и метода проб и ошибок, чтобы обеспечить стабильную и быструю работу системы.

На рис. 3 показана типичная система управления с отрицательной обратной связью, где n_r и n – опорный и выходной сигналы, а $G(s)$ и $C(s)$ – передаточные функции объекта управления и регулятора. Параметры регулятора FOPID приведены в табл. 3.

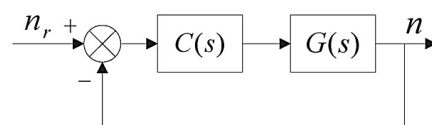


Рис. 3. Блок-схема системы управления с обратной связью

Таблица 3

Параметры FOPID-регулятора

Параметр	Значение
K_p	200
K_i	1
λ	0,5 [$0 < \lambda < 2$]
K_d	1
μ	0,5 [$0 < \mu < 2$]
Диапазон частот	0,001–1000
Порядок аппроксимации	5

Для обеспечения эффективной настройки регулятора FOPID были определены допустимые границы для каждого из пяти параметров. Коэффициенты усиления пропорциональной K_p составляющей ограни-

чивались диапазоном от 150 до 200, интегральной K_i и дифференциальной K_d составляющих – от 0 до 1, что обеспечивает достаточную гибкость при сохранении устойчивости системы. Порядки дробного интегрирования λ и дифференцирования μ были ограничены диапазоном от 0 до 2 в соответствии с устоявшейся практикой в научной литературе, чтобы избежать неустойчивости или чрезмерной чувствительности системы. Эти границы выбраны на основе сочетания теоретических соображений, критериев устойчивости и предварительных результатов моделирования. Начальные значения параметров выбраны эвристически в пределах заданных границ с целью облегчения сходимости процесса настройки и снижения вычислительной нагрузки.

Передаточная функция объекта управления $G(s)$, используемая в качестве примера, имеет следующий вид:

$$G(s) = \frac{K}{(J_s + b)(L_s + R) + K^2}, \quad (15)$$

где J – момент инерции вращающейся механической части, кг·м²; b – коэффициент механического трения (коэффициент вязкого трения), Н·м·с/рад; K – постоянная момента двигателя, Н·м/А или В·с/рад; R – электрическое сопротивление, Ом; L – электрическая индуктивность, Гн; s – переменная Лапласа (Laplace variable); $L_s + R$ – эквивалентное сопротивление электрического тока в частотной области (электрическая схема двигателя в области Лапласа); $J_s + b$ – механическое поведение ротора (инерция с трением).

Передаточная функция классического PID-регулятора $C_{PID}(s)$ задаётся следующим выражением:

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (16)$$

где K_p – коэффициент пропорционального усиления; K_i – коэффициент интегрального усиления; $K_d s$ – дифференциальный коэффициент (Derivative gain) (способ представления математического дифференцирования в области Лапласа); s – переменная Лапласа (Laplace variable).

Регулятор FOPID обобщает порядки интегрирования и дифференцирования до дробных степеней:

$$C_{FOPID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu, \quad (17)$$

где K_p , K_i , K_d те же коэффициенты, что и рассмотренные ранее; $K_d s^\mu$ – управляет скоростью изменения ошибки частично, что позволяет уменьшить колебания и превышения, а также улучшить устойчивость системы по сравнению с традиционным PID-регулятором; s^λ – дробная интегральная часть в FOPID; λ – дробный порядок интегрирования (обычно $0 < \lambda \leq 2$); μ – дробный порядок дифференцирования (обычно $0 < \mu \leq 2$), (диапазон $0 < \lambda, \mu \leq 2$

позволяет управлять процессом от частичного интеграла/дифференциала до воздействия более высокого порядка, что обеспечивает FOPID значительно большую гибкость по сравнению с традиционным PID-регулятором, для которого λ и μ равны 1).

При условии единичной обратной связи передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}, \quad (18)$$

где $C(s)$ – это $C_{PID}(s)$, либо $C_{FOPID}(s)$.

В качестве критерия качества используется интеграл модуля ошибки, взвешенной по времени (ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error).

Целевая функция оптимизации – ITAE, минимизируемая в ходе настройки и определяемая следующим образом:

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (19)$$

где $e(t) = r(t) - y(t)$ – сигнал ошибки между опорным воздействием $r(t)$ (как правило, ступенчатым сигналом) и выходом системы $y(t)$; T – общее время моделирования.

Интеграл квадрата ошибки (ISE – Integral of Squared Error) определяется следующим образом:

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt. \quad (20)$$

ISE представляет собой интеграл квадрата сигнала ошибки по времени, цель этого критерия заключается в том, чтобы более строго наказывать большие ошибки за счёт возведения в квадрат. Он особенно подходит для приложений, в которых необходимо максимально избегать значительных отклонений.

Интеграл абсолютной ошибки (IAE – Integral of Absolute Error) может быть выражен следующим образом:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (21)$$

IAE представляет собой интеграл модуля сигнала ошибки по времени. Цель данного критерия – учитывать все ошибки пропорционально, независимо от их величины. Он часто используется в случаях, когда важно минимизировать постоянные малые отклонения.

Настроенный регулятор FOPID превосходит настроенный PID-регулятор по всем показателям, достигая меньшего значения ITAE (8,90 против 12,35), сниженного ISE (4,32 против 5,68) и значительно меньшего превышения (8,5 % против 15,0 %). Кроме того, он демонстрирует более быстрое время установки – 1,88 с по сравнению с 2,12 с у PID-регулятора (рис. 4). Ненастроенный FOPID-регулятор, несмотря на нулевое перерегулирование и относительно низкий ISE, не сходится по показателям ITAE и времени установления, о чём свидетельст-

вуют бесконечные значения. Эти результаты подчёркивают важность правильной настройки регуляторов FOPID для полного раскрытия их потенциала в улучшении динамических характеристик. Сравнение производительности регуляторов наглядно можно представить в виде сгруппированной столбчатой диаграммы, на которой будут выделены ключевые показатели, включая *ITAE*, *ISE*, превышение и время установки.

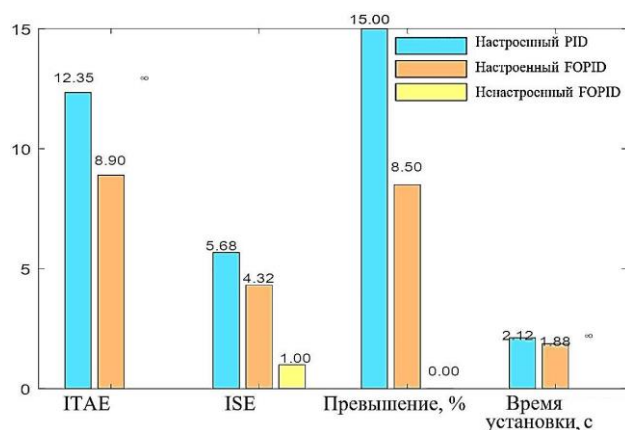


Рис. 4. Сравнительный анализ эффективности PID- и FOPID-регуляторов

Выводы

В данной работе проведена сравнительная оценка традиционного PID-регулятора и регулятора дробного порядка (FOPID) для двухосной системы слежения за солнцем с целью повышения эффек-

тивности преобразования энергии солнца фотоэлектрическими системами. Хотя PID-регуляторы широко используются благодаря своей простоте, в работе подчеркиваются преимущества применения FOPID-регулятора для достижения повышенной точности управления, более быстрого динамического отклика и уменьшения ошибок отслеживания как по азимуту, так и по углу места. Сформулирована общая методология, реализуемая в данном исследовании для оптимизации и оценки характеристик регуляторов PID и FOPID в системе двухосевого слежения за солнцем.

1. Процесс начинается с моделирования динамики объекта, за которым следует определение критерия качества, которым в данном случае является интеграл модуля ошибки, взвешенной по времени (*ITAE*).

2. Для настройки параметров регуляторов PID и FOPID применяется метод оптимизации роя частиц (*PSO*). После оптимизации отклики замкнутой системы моделируются с использованием полученных параметров.

3. Значения *ITAE* рассчитываются для каждого регулятора и используются в качестве основы для сравнения их производительности.

4. В заключение строится столбчатая диаграмма для наглядного сравнения эффективности двух стратегий управления.

Такой системный подход обеспечивает объективную и количественную оценку работы регуляторов в одинаковых условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комбинированные ветро-фотоэлектрические системы для энергоснабжения южных регионов Российской Федерации / Л.М. Абдали, В.А. Афанасьев, В.В. Кувшинов [и др.] // Энергетические установки и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 18–24. EDN: VAAIEI.
2. Kazem H.A., Chaichan M.T. The effect of environmental conditions on concentrator photovoltaic performance // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015. № 6(5). Pp. 850–854.
3. Charrada K., Bouazzi A. Comparative analysis of solar tracking systems for photovoltaic panels // Solar Energy. 2020. № 209. Pp. 76–88.
4. A hybrid FOPID-PSO control strategy for torque ripple reduction in wind energy conversion systems / R. Azim, M.A. Rahman, M.N. Uddin, M.S. Alam // IEEE Transactions on Industry Applications. 2025. URL : <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3550137> (date of application: 18.05.2025).
5. Zhang, L., Huang T., Li Q. Robust FOPID control for hydrogen energy storage integration in smart grid applications // IEEE Access. 2024. № 12. Pp. 114320–114331. URL : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3513355> (date of application: 18.05.2025).
6. Nadia AL-Rousan, Nor Ashidi Mat Isa, Mohd Khairunaz Mat Desa. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system // Journal of King Saud University. Engineering Sciences. 2020. № 32. Pp. 459–469.
7. Combined energy systems based on renewable energy sources / Abdali Layth Mohammed, Muataz Najim Al-Maliki, Rashid Hameed Hejeejo [et al.] // MM Science Journal. 2023. Pp. 7131–7135. URL : https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_12_2023131 (date of application: 18.05.2025).
8. Design, Modeling, and Control of a Dual-Axis Solar Tracker Using Fractional Order PID Controllers for Enhanced Energy Efficiency / Hayder Abdulsahib Issa, Layth Mohammed Abdali, Haider Alhusseini, V.I. Velkin // Results in Engineering. 2025. P. 106073. URL : <https://doi.org/10.1016/j.rineng> (date of application: 18.05.2025).
9. Sergio Isai Palomino, Diego Flores, Norma Lozada-Castillo. Design and implementation of Model-Based Predictive Control for two-axis Solar Tracker // Solar Energy. 2023. № 265. P. 112080. doi:10.1016/j.solener.2023.112080.
10. Optimal Selection of the Control Strategy for Dual-Axis Solar Tracking Systems // S.I. Palomino-Resendiz, F.A. Ortiz-Martínez, I.V. Paramo-Ortega [et al.] // IEEE Access. Vol. 11. Pp. 56561–56573. 2023. doi:10.1109/ACCESS.2023.3283336
11. Experimental studies on receiving surfaces of flat solar collectors / V.V. Kuvshinov, L.M. Abd Ali, N.V. Morozova [et al.] // Surface engineering and applied electrochemistry. 2021. № 57. Pp. 715–720.
12. A Novel Design and Experimental Study for a Two-Axis Sun Tracker / F. Shama, G.H. Roshani, A. Ahmadi, S. Roshani // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China. 2011. Pp. 1–4. doi:10.1109/APPEEC.2011.5748909

13. On the PV Tracker Performance: Tracking the Sun Versus Tracking the Best Orientation / C.D. Rodríguez-Gallegos, O. Gandhi, S.K. Panda, T. Reindl // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2020. Vol. 10, № 5. Pp. 1474–1480. doi:10.1109/JPHOTOV.2020.3006994
14. New Optimized FOPIDA-FOIDN Controller for the Frequency Regulation of Hybrid Multi-Area Interconnected Microgrids / N.M. Ahmed, M. Ebeed, G. Magdy [et al.] // *Fractal Fract.* 2023. № 7. P. 666. URL : <https://doi.org/10.3390/fractalfract7090666> (date of application: 18.05.2025)

REFERENCES

1. Kombinirovannye vetro-fotoelektricheskie sistemy dlya energosnabzheniya yuzhnyh regionov Rossijskoj Federacii [Combined wind-and-photovoltaic systems for power supply to southern regions of Russian Federation] / L.M. Abdali, V.A. Afanasev, V.V. Kuvshinov [i dr.] // *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2025. T. 11, № 2. S. 18–24. EDN: VAAIEI.
2. Kazem H.A., Chaichan, M.T. The effect of environmental conditions on concentrator photovoltaic performance // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2015. № 6(5). Pp. 850–854.
3. Charrada K., Bouazzi A. Comparative analysis of solar tracking systems for photovoltaic panels // *Solar Energy*. 2020. № 209. Pp. 76–88.
4. A hybrid FOPID-PSO control strategy for torque ripple reduction in wind energy conversion systems / R. Azim, M.A. Rahman, M.N. Uddin, M.S. Alam // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2025. URL : <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3550137> (date of application: 18.05.2025).
5. Zhang, L., Huang, T., Li, Q. Robust FOPID control for hydrogen energy storage integration in smart grid applications // *IEEE Access*. 2024. № 12. Pp. 114320–114331. URL : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3513355> (date of application: 18.05.2025).
6. Nadia AL-Rousan, Nor Ashidi Mat Isa, Mohd Khairunaz Mat Desa. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system // *Journal of King Saud University. Engineering Sciences*. 2020. № 32. Pp. 459–469
7. Combined energy systems based on renewable energy sources / Abdali Layth Mohammed, Muataz Najim Al-Maliki, Rashid Hameed Hejeejo [et al.] // *MM Science Journal*. 2023. Pp. 7131–7135. URL : https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_12_2023131 (date of application: 18.05.2025).
8. Design, Modeling, and Control of a Dual-Axis Solar Tracker Using Fractional Order PID Controllers for Enhanced Energy Efficiency / Hayder Abdulsahib Issa, Layth Mohammed Abdali, Haider Alhusseini, V.I. Velkin // *Results in Engineering*. 2025. P. 106073. URL : <https://doi.org/10.1016/j.rineng> (date of application: 18.05.2025).
9. Sergio Isai Palomino, Diego Flores, Norma Lozada-Castillo. Design and implementation of Model-Based Predictive Control for two-axis Solar Tracker // *Solar Energy*. 2023. № 265. P. 112080. doi:10.1016/j.solener.2023.112080
10. Optimal Selection of the Control Strategy for Dual-Axis Solar Tracking Systems // S.I. Palomino-Resendiz, F.A. Ortiz-Martínez, I.V. Paramo-Ortega [et al.] // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 56561–56573. doi:10.1109/ACCESS.2023.3283336
11. Experimental studies on receiving surfaces of flat solar collectors / V.V. Kuvshinov, L. M. Abd Ali, N.V. Morozova [et al.] // *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2021. № 57. Pp. 715–720.
12. A Novel Design and Experimental Study for a Two-Axis Sun Tracker / F. Shama, G.H. Roshani, A. Ahmadi, S. Roshani // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China. 2011. Pp. 1–4. doi:10.1109/APPEEC.2011.5748909
13. On the PV Tracker Performance: Tracking the Sun Versus Tracking the Best Orientation / C.D. Rodríguez-Gallegos, O. Gandhi, S.K. Panda, T. Reindl // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2020. Vol. 10, № 5. Pp. 1474–1480. doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3006994
14. New Optimized FOPIDA-FOIDN Controller for the Frequency Regulation of Hybrid Multi-Area Interconnected Microgrids / N.M. Ahmed, M. Ebeed, G. Magdy [et al.] // *Fractal Fract.* 2023. № 7. P. 666. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7090666> (date of application: 18.05.2025).

Информация об авторах

Исса Хайдер Абдулсахиб Исса – аспирант кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии»;
В.И. Велькин – кандидат технических наук, кафедра «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии»;
Абдали Лаит Мохаммед Абдали – кандидат технических наук;
В.В. Кувшинов – кандидат технических наук, кафедра «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии»;
С.П. Муровский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;
С.Е. Щеклеин – доктор технических наук, профессор кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии».

Information about the authors

Issa Hayder A. – Post-graduate Student, Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department;
V.I. Velkin – Candidate of Science (Engineering), Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department;
Abdali Layth M. – Candidate of Science (Engineering);
V.V. Kuvshinov – Candidate of Science (Engineering), Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources Department;
S.P. Murovsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department;
S.E. Shcheklein – Doctor of Science (Engineering), Professor, Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department.

Статья поступила в редакцию 02.07.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.
The article was submitted: 02.07.2025; approved after reviewing: 15.09.2025; accepted for publication: 15.09.2025.

Научная статья
УДК 621.865.8:625.14
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-96-101

РАЗРАБОТКА НОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА СБОРКИ РЕЛЬСОШПАЛЬНЫХ РЕШЕТОК

Смирных Илья Александрович¹, Жигунов Максим Александрович²,
Гуляев Александр Викторович³, Тен Евгений Енгунович⁴

^{1, 2, 3, 4} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ ilya.smirnykh.2001@mail.com

² maksim_10202@mail.ru

³ 89143127984@ya.ru

⁴ ugene_ten@mail.ru

Аннотация. Рассматривается применение гайковертов в автоматизированных комплексах сборки рельсошпальных решеток. Описываются проблемы существующих устройств, такие как низкая надежность и точность существующей системы управления, и предлагается новая система управления, исключающая существующие недостатки. Исследование включает разработку, пусконаладочные работы и тестирование новой схемы, используемой на модернизированной установке, с применением функций управления по моменту и скорости для повышения точности управления посредством преобразователей частоты и тензодатчиков.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс сборки рельсошпальных решеток, гайковерты, токовые реле, погрешность, тензометрические датчики, аналоговый сигнал, частотный преобразователь, PID-регулятор

Original article

MODERNIZATION OF A ROBOTIC COMPLEX FOR ASSEMBLING RAIL-TIE GRIDS

Smirnykh Ilya A.¹, Zhigunov Maxim A.², Gulyaev Alexander V.³, Ten Evgeny E.⁴

^{1, 2, 3, 4} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ ilya.smirnykh.2001@mail.com

² maksim_10202@mail.ru

³ 89143127984@ya.ru

⁴ ugene_ten@mail.ru

Annotation. The study investigates the use of wrenches within robotic systems designed for assembling rail-sleeper grids. Issues with existing devices, including limited reliability and inaccurate control systems, are discussed. A novel control system eliminating these deficiencies is proposed. The research details the development, commissioning and testing of a new scheme implemented on an upgraded installation, using functions of torque and speed control to improve overall control accuracy by means of frequency converters and strain gauges.

Keywords: robotic rail-sleeper assembly complex, wrenches, current relays, error, strain gauges, analog signal, frequency converter, PID controller

Линия автоматизированного комплекса сборки рельсошпальных решеток (РКСР) была установлена в 2021 г. с целью конструирования новых звеньев путевой решетки для железнодорожного пути, состоящих из железобетонных шпал, адаптированных под скрепления модификаций ЖБР, АРС, Фоссло (W30) и ПФК-350 [1–6]. Установка функционирует в условиях закрытого помещения базы путевой машинной станции. Процессы проектирования, сборки, монтажа и последующего ввода в эксплуатацию данной линии осуществлялись Хабаровским центром путевых звеносборочных линий и машин, действующим в рамках отделения пути и

путевых машин проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре, филиала ОАО «РЖД» [1].

В общем виде вся существующая до модернизации система завинчивания представляет собой четыре асинхронных двигателя (рис. 1). Двигатели организованы в конструкции гайковерта попарно. Крутящий момент от электродвигателя передается на редуктор, который изменяет скорость вращения и крутящий момент, передающие вращение от электродвигателя к валу гайковерта. Крутящий момент передается на вал инструмента, вращающий головку с насадкой. Она, в свою очередь, захватывает гайку и завинчивает ее.

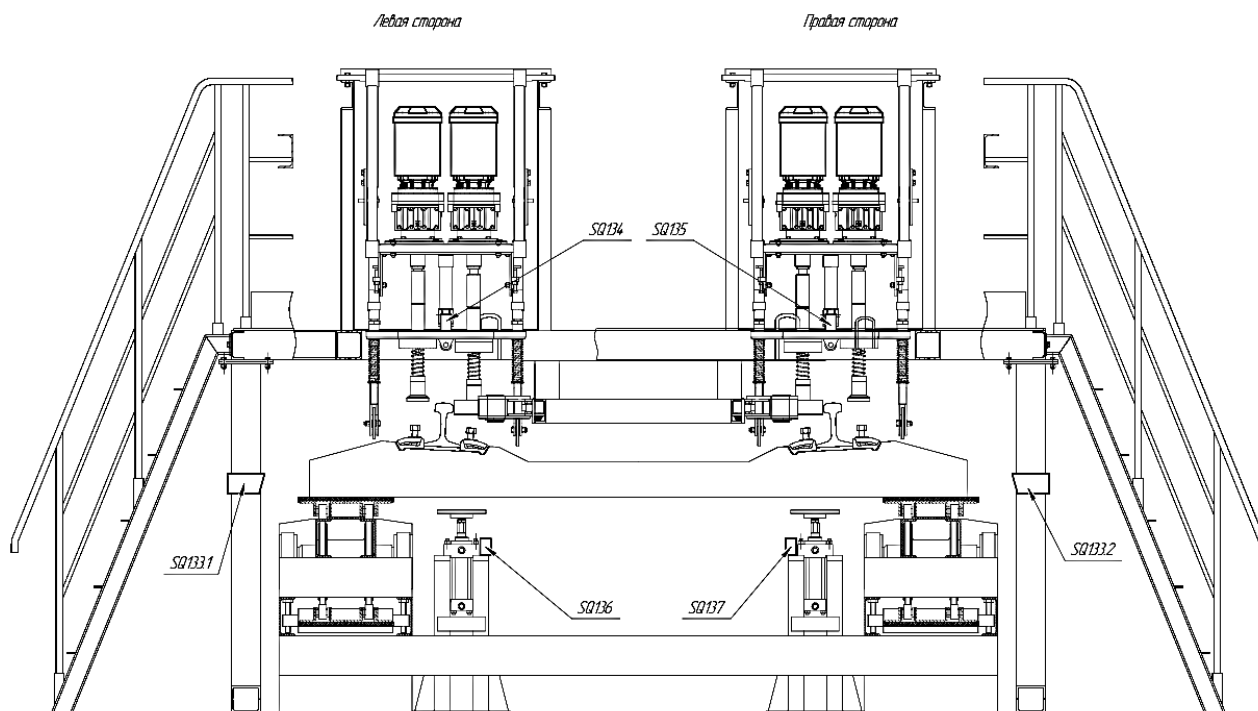


Рис. 1. Схема устройства закручивания

Гайковерты находятся на сборочном конвейере, т.е. к ним подходит рельсошпальная решетка, на которую накинута клемма; таким образом она полностью подготовлена к тому, чтобы гайковерты сразу опустились на шпалу и закрутили 4 гайки, прижали клеммами рельсу, и звено продолжает движение далее.

Основные стандартные эпюры укладки шпал: 46 шпал – на 25-метровом звене в прямых участках и 50 шпал – в звене для кривых участков радиусом более 1200 м. Соответственно при движении звена гайковерт опускается на одно звено 46–50 раз. Опускается он по прерыванию барьера оптического датчика, представляющего собой приёмник и излучатель, установленные напротив друг друга. Когда луч перегораживается шпалой, подается сигнал о том, что она находится под гайковертами.

Гайковерты подключены к частотным преобразователям, сообщенным с ПЛК Phoenix Contact через коммутатор посредством интерфейса Ethernet по протоколу Profinet. Когда шпала (рис. 2) подъезжает под оптический датчик, подключенный к модулю дискретного ввода (DI) ПЛК, то контроллер подает команду начала закручивания. Подается сигнал на опускание двух траверс – конструкций, на которых держится гайковерт, левой и правой. Две пары двигателей работают попарно и независимо друг от друга: когда одна пара закончила процесс докручивания, она поднимается независимо от другой пары. Опускается конструкция траверсы посредством гидравлического привода.

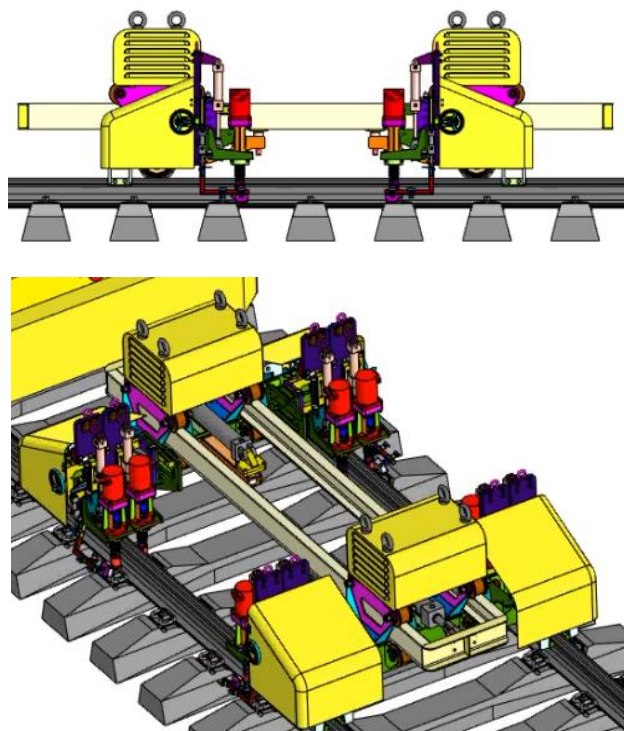


Рис. 2. Модель агрегата закручивания

Специальная механическая система «Ловителя» позволяет гайковерту осуществить захват шпалы, даже если она проехала несколько миллиметров или, наоборот, ось закручивания, или если что-то другое перекрыло датчик, например, из-за снега, налипшего на шпалах, который иногда может заходить под

датчик раньше шпалы. В таких случаях шпала не доходит до нужного места, и конструкция «Ловителя» позволяет посадить шпindel так, чтобы он сел даже под небольшим углом. Таким образом гайковерт попадает на гайку.

Если гайковерт не попал на гайку из-за большого отклонения или закрутился вхолостую, когда не попал, то в логике контроллера предусмотрен таймер на максимальное время закручивания – 6–7 с, это редактируемое с НМИ-панели оператора время, таймаут завинчивания. При этом когда проходит время до данной уставки программный блок гайковерта, отвечающий за ошибку, выдает уведомление о том, что закручивание не выполнено, и код ошибки, затем перезагружает цикл завинчивания, поднимает траверсу и ждет следующую шпалу. Это сделано для устранения режима «залипания» устройства. В нормальном режиме работы выполняется закручивание до установленного порогового значения момента.

Однако проблема заключается в том, что момент фиксируется косвенно. Измерение момента осуществляется через измерительный преобразователь тока. Трансформатор тока подключается к статорной обмотке асинхронного двигателя, и по изменению потребляемого тока системой регистрируется изменение момента. Чем больше механическая нагрузка на валу, тем больший момент должен создать двигатель, и тем больший ток он потребляет. Сигнал от датчика тока передается на аналоговый модуль ввода (AI) ПЛК, где программный код осуществляет его первичную обработку. После пересчета измеренного тока в условные единицы в программе определяется соответствие заданному значению момента. Если, согласно алгоритму, текущее значение становится равным заданному то контроллер осуществляет отключение электродвигателя от сети питания с помощью контактора. Но при этом на данный параметр, т.е. контролируемый ток, также влияет и напряжение в сети питания. Снижение напряжения приведет к увеличению тока для поддержания необходимой мощности при той же нагрузке. Это и является основным недостатком первоначальной системы [1–6].

Так как в цеховой питающей сети присутствуют мощные потребители, например, различного рода крановое оборудование, главным образом мостовые краны, то при пуске приводов этого оборудования происходит значительное снижение напряжения в общей питающей сети. Такие колебания напряжения приводят к ошибочным реакциям системы управления гайковертами. Ложные срабатывания системы управления в результате нецелевого изменения параметра предложено устранить усовершенствованием как самой системой измерений, так и изменением способа питания. Чтобы описанное оборудование стало работать независимо от

смежных производственных установок, предлагается выполнять измерительную систему на основе тензометрических преобразователей для осуществления непосредственного контроля момента, а способ питания выполнить на базе преобразователей частоты (ПЧ) стандартной структуры: выпрямитель, звено постоянного напряжения, инвертор.

Новая система управления для автоматизированного комплекса сборки рельсошпальных решеток должна исключать косвенное измерение момента через ток двигателя и переходит к прямому измерению момента с помощью тензометрических датчиков, что устранит зависимость системы от колебаний напряжения в питающей сети. Оригинальный алгоритм управления должен обеспечивать:

- плавное уменьшение скорости вращения привода во всем диапазоне работы;
- высокую точность закручивания за счет ПИД-регулирования;
- независимость от работы смежного оборудования.

Первая реализованная схема управления была выполнена полностью на базе ПЧ. Комплектный тензометрический преобразователь с ячейкой-конвертером сигнала измеренного момента в унифицированный сигнал 0–10 В подключен к АЦП преобразователя частоты. В преобразователе частоты выполнена конфигурация формирования регулирующего воздействия на асинхронный двигатель в соответствии с функциональной зависимостью. Функция управления записывается в память внутреннего контроллера ПЧ в формате табличных данных о заданных ступенях скорости вращения от максимального значения до 0. В настройках ПЧ источником задания скорости задан момент, когда скорость опускается до уровня ~15 %, тогда останавливается работа частотного преобразователя, т.е. напряжение питания с двигателя снимается.

Таким образом, полный алгоритм работы новой системы включает следующие операции в заданной последовательности: определяется шпала, далее опускается траверса, включается ПЧ и вращается шпindel, запускается гайковерт насадкой, захватывающий болт, начинается процесс затягивания, далее происходит увеличение момента. Тем самым задание скорости вращения привода происходит от тензодатчика, т.е. оно напрямую зависит от момента. Следовательно, когда момент увеличивается, скорость снижается, и когда скорость опускается до 10 %, или до частоты ~5–10 Гц, то контроллер ПЧ останавливает полностью работу привода. Так выполнено в настоящей системе после первого этапа модернизации, т.е. система ориентируется на момент, а не на ток двигателя.

С другой стороны, при таком подключении система управления фиксирует момент косвенно, так

как он определяется контроллером ПЧ через контур скорости, что обусловлено ограниченными возможностями настройки самого ПЧ.

Другим недостатком такой системы управления является то, что регулирование скорости вращения осуществляется ступенчато по заданной функции, определенной эмпирическим методом, в виде табличных данных, что приводит к снижению качества процесса регулирования. Дальнейшее улучшение системы предполагает перенос алгоритма управления в ПЛК, где будет осуществляться прямой контроль момента, измеренного с помощью тензометрического датчика, и формирование управляющего воздействия посредством ПИД-регулятора (рис. 3).

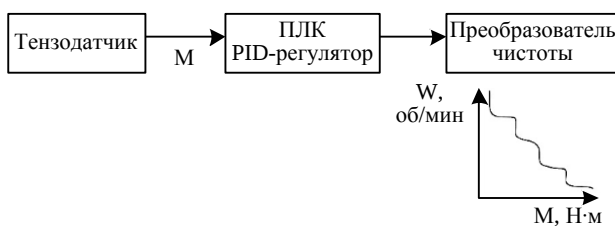


Рис. 3. Принцип управления приводом гайковерта

Таким образом, в итоговой системе управления гайковерта момент агрегата завинчивания регистрируется с помощью тензодатчика, подключаемого через плату преобразования сигналов к аналоговому входу (AI: 0-10 В) ПЛК. Далее программой ПЛК через ПИД-контроллер определяется величина рассогласования между текущим и заданным значением момента, и затем на выходе регулятора вычисляется управляющее воздействие для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя гайковерта. Вычисленное значение скорости передается на ПЧ по сети Profinet.

Система построена по распределенному принципу «контроллер–коптеры»: в качестве средства управления линией используется панель оператора (ЕМТ3150), реализующая весь необходимый функционал, включая диагностический. Во встроенном web-интерфейсе (192.168.1.100) реализовано несколько страниц для диагностики датчиков.

Обмен данным между контроллером, коплерами и панелью оператора производится по сети Ethernet 100Mbit с использованием смешанной топологии подключения по протоколам:

- контроллер–коптеры: PROFINET;
- контроллер–панель оператора MODBUS TCP/IP;

контроллер выполняет роль сервера на порту 502, доступно обслуживание 1 клиента.

На рис. 4 представлен фрагмент программного кода, исполняющего алгоритм управления агрегата, выполненного в среде PC Worx.

Принцип работы: чтение входных данных: блоки INT_TO_REAL и INT_TO_DINT считывают текущие значения тока, уставки и ручного управления с контроллера.

PID-регулятор: блок PID-1 вычисляет выходное значение на основе текущего значения процесса PV, заданного значения SP и коэффициентов PID K_p , K_i , K_d .

Мультиплексор: блок MUX выбирает между выходом PID-регулятора и ручным управлением (Man_Out) в зависимости от режима работы.

Запись выходного значения: блок READ_DINT записывает выбранное значение (PID_Out) на контроллер для управления исполнительным механизмом. Когда сигнал _PauseConveyor активен, блок ScrewerBlock получает команду на паузу. Это приводит к активации выхода Pause, что останавливает работу устройства закручивания винтов.

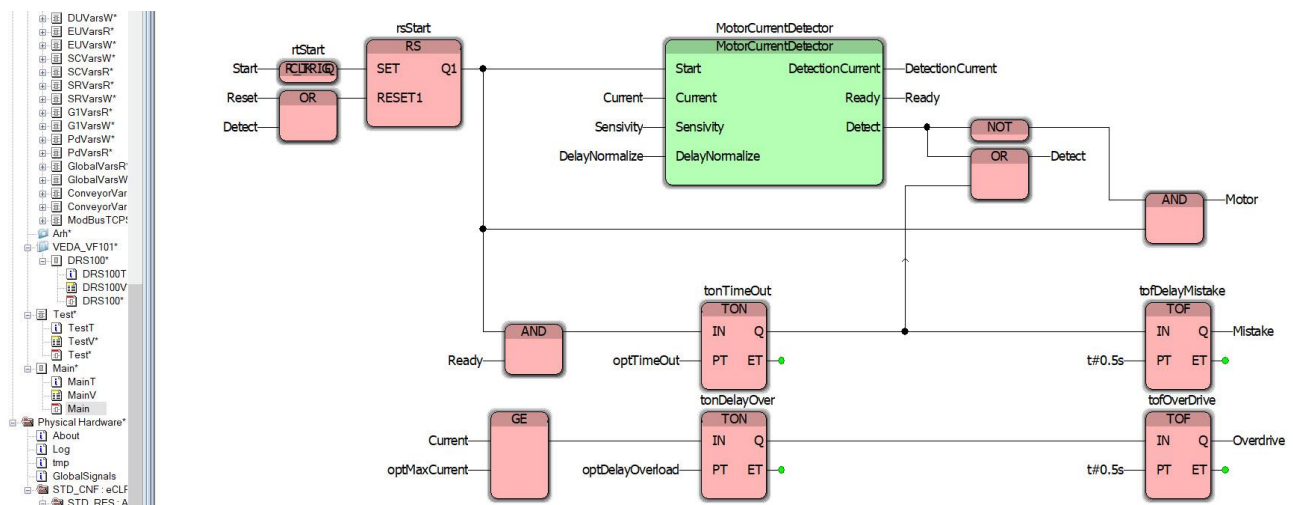


Рис. 4. Фрагмент программного кода управления

Сигнал Forwarding указывает на необходимость пересылки или продолжения работы. В зависимости от состояния других внутренних логических условий, блок может активировать различные режимы работы:

- LocalEnable: локальное включение устройства, может быть использовано для тестирования или настройки устройства на месте;

- ManualEnable: ручное включение, режим позволяет оператору вручную управлять процессом закручивания винтов;

- AutoEnable: автоматическое включение, в этом режиме устройство работает автоматически, без вмешательства оператора;

- выход Processing активируется, когда устройство выполняет процесс закручивания винтов, этот сигнал может использоваться для синхронизации с другими узлами системы или для отслеживания состояния процесса.

Блок «SET RESET1» используется для установки начальных условий и сброса системы.

Вход «nStart» инициирует начало работы.

Вход «Q1» указывает на состояние системы.

Управление двигателем: блок «Motor» управляет работой двигателя на основе полученных сигналов и условий.

Такое управление позволяет реализовать плавное уменьшение скорости вращения привода гайковерта во всем диапазоне функционирования ав-

томатизированного комплекса, от максимального значения до полной остановки, что определяет точность закручивания. Затем осуществляется подъем траверсы и переход к новому циклу. В данном варианте исполнения система управления приводом гайковерта не зависит от работы смежного оборудования и от снижения напряжения в сети питания двигателей переменного тока.

В предлагаемой системе увеличивается надежность, быстродействие и качество регулирования процесса закручивания за счет использования ПИД-регулятора. Дополнительно на постах работы гайковерта предусмотрены органы ручного управления. В случае возникновения какой-либо внештатной ситуации или проведения сервисного обслуживания также предусмотрены кнопки аварийного останова.

Комплексный подход к модернизации, сочетающий аппаратные усовершенствования (тензодатчики, частотные преобразователи) с разработкой новых алгоритмов управления и созданием распределенной системы управления промышленной сетью, позволил испытать систему на реальном производственном оборудовании, где она показала:

- повышение надежности и быстродействие;
- улучшение качества регулирования процесса закручивания;
- устранение ложных срабатываний из-за колебаний напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шекеро Д.А., Скрипачев И.Ф., Клементов А.С. Модернизация проектов звеносборочных линии // Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего Востока России – инновации молодых : тезисы докладов Межвузовской 73-й студенческой научно-практической конференции. Хабаровск, 21 апреля 2015 г. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.З. Ткаченко. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. С. 73. EDN: SIUXAQ.
2. Патент № 2761484 С1 Российская Федерация, МПК E01B 29/24. автоматизированный комплекс сборки рельсошпальной решетки железнодорожного пути : № 2021101125 : заявл. 20.01.2021 : опубл. 08.12.2021 / А.С. Клементов, К.В. Змеев, С.В. Саксонин [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN: ILAHSP.
3. Клементов, А.С., Скрипачев И.Ф., Белоус Т.В. Вопросы автоматизации звеносборочного производства // Вестник института тяги и подвижного состава. 2022. № 18. С. 30–33. EDN: AKRGGD.
4. Техническое обслуживание и ремонт звеносборочно-разборочной техники / А.И. Бунин, А.С. Клементов, И.Ф. Скрипачев, А.И. Григорьева // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 3. С. 36–37. EDN: NURVET.
5. Патент № 2410484 С2 Российская Федерация, МПК E01B 29/24. Поточная линия для сборки рельсовых звеньев : № 2009108584/11 : заявл. 10.03.2009 : опубл. 27.01.2011 / А.И. Марголин, А.С. Клементов, В.Е. Васильев, И.Ф. Скрипачев ; заявитель Открытое акционерное общество Научно-внедренческий центр «Путевые машины». EDN: HFORZW.
6. Комплексный процесс ремонта звеньев путевой решетки / А.С. Пикалов, А.С. Клементов, А.А. Севостьянов, О.Н. Куликов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(56). С. 5–11. EDN: APTDNQ. doi:10.52170/1815-9262_2021_56_5
7. Гуляев А.В., Фокин Д.С., Ефременко В.Г. Основы промышленной автоматизации и робототехники : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. 69 с. EDN: QFNFDQ.
8. Гуляев А.В., Тен Е.Е., Фокин Д.С. Программирование логических контроллеров в программной среде SoMachine для электротехнических систем с автоматическим управлением : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017.
9. Гуляев А.В., Тен Е.Е., Фокин Д.С. Программирование логических контроллеров в среде CoDeSys для автоматизированных систем управления. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2022. 64 с. EDN: QOZZDG.

REFERENCES

1. Shekero D.A., Skripachev I.F., Klementov A.S. Modernizatsiya proektov zvenosborochnykh liniy [Modernization of assembly line projects] // Nauchno-tekhnicheskomu i social'no-ekonomicheskomu razvitiyu Dal'nego Vostoka Rossii – innovatsii molodykh : tezisy dokladov Mezhdunarodnoy 73-j studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Khabarovsk, 21 aprilya 2015 g. V 2 t. T.1 / pod red. A.Z. Tkachenko. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2015. S. 73. EDN: SIUXAQ.
2. Patent № 2761484 C1 Rossiyskaya Federatsiya, IPC E01B 29/24. Avtomatizirovanny kompleks sborki rel'soshpal'noj reshetki zheleznodorozhnogo puti [Patent No. 2761484 C1 Russian Federation, IPC E01B 29/24. Automated complex for assembly of rail-sleeper grid of railway track] : № 2021101125 : zayavl. 20.01.2021 : opubl. 08.12.2021 / A.S. Klementov, K.V. Zmeev, S.V. Saksonin [i dr.]; zayavitel' Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo «Rossiyskie zheleznnye dorogi». EDN: ILAHSP.
3. Klementov A.S., Skripachev I.F., Belous T.V. Voprosy avtomatizatsii zvenosborochnogo proizvodstva [Issues of automation of link assembly production] // Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava. 2022. № 18. S. 30–33. EDN: AKRGGD.
4. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont zvenosborochnorazborochnoj tekhniki [Maintenance and repair of assembly and disassembly equipment] /A.I. Bunin, A.S. Klementov, I.F. Skripachev, A.I. Grigoriev // Put' i putevye khozyajstvo. 2011. № 3. S. 36–37. EDN: NURVET.
5. Patent № 2410484 C2 Rossiyskaya Federatsiya, MPC E01B 29/24. Potochnaya liniya dlya sborki rel'sovykh zven'ev [Patent No. 2410484 C2 Russian Federation, MPC E01B 29/24. Production line for assembly of rail links] : № 2009108584/11: zayavl. 10.03.2009 : opubl. 27.01.2011 / A.I. Margolin, A.S. Klementov, V.E. Vasiliev, I.F. Skripachev ; zayavitel' Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo Nauchno-vnedrencheskiy Tsentr «Putevye mashiny». EDN: HFORZW.
6. Kompleksnyy protsess remonta zven'ev putevoj reshetki [Comprehensive process of repair of track grid links] / A.S. Pikalov, A.S. Klementov, A.A. Sevostyanov, O.N. Kulikov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. № 1(56). S. 5–11. EDN: APTDNQ. doi:10.52170/1815-9262_2021_56_5
7. Gulyaev A.V., Fokin D.S., Efremenko V.G. Osnovy promyshlennoy avtomatizatsii i robototekhniki [Fundamentals of industrial automation and robotics] : uchebnoe posobie. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2024. 69 s. EDN: QFNFQD.
8. Gulyaev A.V., Ten E.E., Fokin D.S. Programirovanie logicheskikh kontrollerov v programnoj srede SoMachine dlya elektrotekhnicheskikh sistem s avtomaticheskim upravleniem [Programming logic controllers in the SoMachine software environment for self-controlled electrical systems] : uchebnoe posobie. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2017.
9. Gulyaev A.V., Ten E.E., Fokin D.S. Programirovanie logicheskikh kontrollerov v programnoj srede CoDeSys dlya avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Programming of logic controllers in the CoDeSys environment for automated control systems] Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2022. 64 s. EDN: QOZZDG.

Информация об авторах

И.А. Смирных – магистрант;
М.А. Жигунов – магистрант;
А.В. Гуляев – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;
Е.Е. Тен – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика».

Information about the authors

I.A. Smirnykh – Master degree Student;
M.A. Zhigunov – Master degree Student;
A.V. Gulyaev – Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;
E.E. Ten – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принята к публикации 27.06.2025.
The article was submitted: 23.05.2025; approved after reviewing: 27.06.2025; accepted for publication: 27.06.2025.

Научная статья
УДК 629.4.016.2
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-102-107

АНАЛИЗ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРИГОРОДНОМ ДВИЖЕНИИ

Маринин Сергей Александрович

Нижегородский институт путей сообщения – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, Нижний Новгород, Россия, marininsergey.nn@mail.ru

Аннотация. Несмотря на рост рекуперации на сети дорог, остаются большие резервы для её увеличения. Их использование возможно лишь при понимании причин, от которых зависит количество электроэнергии, возвращаемой в контактную сеть при торможении. На примере участка Нижний Новгород – Заволжье Горьковской железной дороги определены факторы, оказывающие значимое влияние на объём рекупируемой электроэнергии. В качестве исходных данных использована выборка маршрутных листов машинистов за 2021 г., данные по климатическим параметрам и классам квалификации машинистов. Определён вид распределения статистических данных, и с использованием инструментов теории вероятностей и математической статистики выполнены расчёты. По итогам вычислений в качестве базового фактора принята температура окружающего воздуха как оказывающая наибольшее влияние на итоговый показатель. Также установлено, что значимое влияние на объём рекупируемой электроэнергии может оказывать класс квалификации машиниста, его личное мастерство и техническое состояние электроподвижного состава. Значимость влияния населённости поезда на итоговый показатель в рассмотренном случае не подтвердилась.

Ключевые слова: электропоезд, рекуперация электроэнергии, моторвагонная тяга, пригородное движение, нормальное распределение, корреляционный анализ, дисперсионный анализ

Original article

ANALYSIS OF ELECTRICITY RECOVERY IN COMMUTER TRAFFIC

Marinin Sergey A.

Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering – branch of the Volga Region State University of Railway Engineering, Nizhny Novgorod, Russia, marininsergey.nn@mail.ru

Abstract. Despite the growth of recuperation on the road network, there are still large reserves for its increase. It is possible to use these reserves only if you understand what determines the amount of electricity returned to the contact network during braking. In the article, using the example of the Nizhny Novgorod – Zavolzhye section of the Gorky Railway, factors that have a significant impact on the volume of recovered electricity are identified. A sample of driver waybills for 2021, data on climatic parameters and driver skill classes were used as initial data. The type of distribution of statistical data was determined and calculations were performed using the apparatus of probability theory and mathematical statistics. Based on the calculation results, the outside air temperature was adopted as the basic factor, as it has the greatest impact on the final indicator. It was also found that the driver's skill class, his personal skill and the technical condition of the electric rolling stock can have a significant impact on the volume of recuperated electricity. The significance of the influence of train occupancy on the final indicator in the case under consideration was not confirmed.

Keywords: electric train, energy recovery, multiple unit traction, suitable movement, normal distribution, correlation analysis, dispersion analysis

Введение

Как известно, система рекуперации на тяговом подвижном составе позволяет при торможении часть электроэнергии, затраченной на увеличение кинетической энергии, возвращать в контактную сеть. На современном подвижном составе имеется возможность использовать режим рекуперации в широком диапазоне скоростей. Для создания мотивационных условий для локомотивных бригад по увеличению объёма рекупируемой электроэнергии необходимо её нормирование. В свою очередь, для корректного составления норм требуется понимать, какие факторы влияют на объём рекупируемой электроэнергии.

Приведены итоги исследования по установлению факторов, оказывающих значимое влияние на объём рекупируемой за поездку электроэнергии, выполненного на участке Нижний Новгород – Заволжье.

Исследование статистической базы

Все исследования проведены с использованием статистической базы [1], объёмом 240 маршрутных листов машинистов.

В расчётах методов теории вероятностей и математической статистики, предполагающих нормальность распределения, использовалось распределение объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку.

С этой целью сформулированы нулевая и альтернативная гипотезы. В первом случае предполагается равенство эмпирических и теоретических частот распределения рассматриваемой величины, во втором – различие. При проверке нулевой гипотезы использован критерий согласия Пирсона [2]

$$\chi^2_{\text{набл}} = \frac{\sum (n_i - n'_i)^2}{n'_i},$$

где n_i – эмпирическая частота; n'_i – теоретическая частота.

Далее полученное значение критерия Пирсона было сравнено с критическим. Полученное значение оказалось больше, поэтому принята альтернативная гипотеза. Таким образом, нельзя говорить о соответствии рассматриваемого распределения нормальному, но, несмотря на это, оно достаточно близко к нему.

При изучении выборки выявлено, что в части поездок объём рекуперированной электроэнергии равен нулю. Так как вероятность того, что неисправны сразу оба прибора учёта электроэнергии, мала, то был сделан вывод, что в этих поездках рекуперативное торможение не использовалось, т.е. имеются машинисты, не использующие режим рекуперативного торможения. Эти поездки и повлияли на результат при проверке нулевой гипотезы.

Для получения объективной информации о рекуперированной электроэнергии из выборки были исключены маршрутные листы, в которых объём рекуперированной электроэнергии за поездку равен нулю. Объём выборки уменьшился до 198 маршрутных листов машинистов. Полученная выборка указанным выше способом была проверена на соответствие распределения нормальному. По результатам принята нулевая гипотеза, т.е. подтверждено соответствие распределения нормальному закону с заданным уровнем значимости.

В [3] на примере двухсекционного электровоза было доказано, что расход электроэнергии на тягу на различных секциях не должен отличаться на величину большую, чем погрешность измеритель-

ных приборов. Если разница в расходе больше этого значения, значит, либо неисправен один из приборов учёта, либо имело место вмешательство в работу прибора учёта. В обоих случаях информация с приборов учёта будет недостоверной. Этот принцип был применён к оценке достоверности объёма рекуперированной электроэнергии на электропоезде. В имеющейся выборке определены поездки, в которых разница в показаниях счётчиков учёта рекуперированной электроэнергии на разных секциях была значительной. Было выявлено 9 таких поездок, что составило 4,5 % от общего количества, данные маршрутные листы исключены из выборки. В результате в итоговой выборке оставлено 189 маршрутных листов машинистов, содержащих достоверную информацию о количестве рекуперированной электроэнергии. Новая выборка также была проверена на нормальность распределения. Как и в случае выше, принята нулевая гипотеза, причём расчётное значение критерия стало меньше. Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты проверки распределения
рекуперированной электроэнергии
нормальному закону**

Характеристика выборки	Критерий согласия Пирсона	Критическое значение критерия согласия Пирсона
Вся выборка	26,5	12,6
Без нулевой рекуперации	6,9	
С неисправными приборами учёта	6,7	

На рис. 1 в качестве примера приведена гистограмма плотности распределения объёма рекуперированной за поездку электроэнергии, полученная из достоверной выборки, состоящей из 189 маршрутных листов машинистов. Эта выборка будет использоваться в дальнейших расчётах.

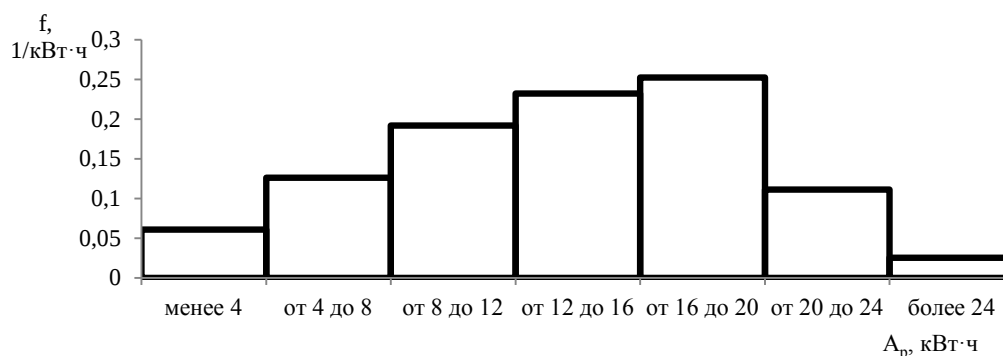


Рис. 1. Гистограмма плотности распределения объёма электроэнергии, рекуперированной за поездку

Определение факторов, влияющих на рекуперацию

В качестве факторов, которые могут влиять на объём электроэнергии, рекуперированной за поездку, были использованы климатические параметры [4].

Соответствие распределения указанных параметров нормальному закону рассмотрено в [4].

Для установления взаимосвязи объёма электроэнергии, рекуперированной за поездку, с климатическими факторами был проведён корреляционный анализ.

Для этого определены парные коэффициенты корреляции между указанными выше величинами [5]

$$r_{xy} = \frac{M\{[X - M(X)][Y - M(Y)]\}}{\sqrt{M(X^2) - [M(X)]^2} \sqrt{M(Y^2) - [M(Y)]^2}},$$

где M – математическое ожидание; X – входная переменная (климатические факторы); Y – выходная переменная (объём электроэнергии, рекуперированной за поездку).

После с использованием Т-критерия выполнена проверка значимости коэффициентов [6]

$$T = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}},$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции между электроэнергией, рекуперированной за поездку, и климатическими факторами; n – объём выборки.

В табл. 2 показаны итоги расчётов, из которых видно, что значимое влияние на объём рекуперированной электроэнергии оказывают температура окружающего воздуха и его влажность, при этом температура окружающего воздуха влияет на исследуемый показатель в большей степени.

В [1] установлено, что температура окружающего воздуха и его влажность достаточно тесно коррелированы, причем их совместный учёт не приводит к более точной оценке влияния. На основании этого принято решение об использовании температуры окружающего воздуха как основного фактора.

На рис. 2 показана зависимость объёма электроэнергии, рекуперированной за поездку, от температуры окружающего воздуха. В данном случае использована линейная аппроксимация. Как видно, имеет место положительная корреляция.

Установлены две причины, объясняющие полученную зависимость. Первая заключается в необходимости выполнения требований, изложенных в [7], в соответствии с которыми в зимний период увеличивается количество случаев использования автотормозов, т.е. происходит замещение части случаев использования рекуперативного торможения. Вторая подразумевает разную квалификацию машинистов, так как степень полноты использования рекуперативного торможения зависит от их мастерства [8].

Далее было изучено влияние загрузки вагонов электропоезда на объём рекуперированной электроэнергии. В связи с отсутствием информации о населённости каждого конкретного электропоезда применён следующий подход. Так как при рассмотренном в выборке обороте электропоездов они отправляются из Нижнего Новгорода на Заволжье вечером, а возвращаются утром, основной пассажиропоток создают люди, следующие утром на работу/учёбу в Нижний Новгород и вечером возвращающиеся домой, то в качестве индикатора населённости электропоездов принят день недели.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа

Проверяемая пара	Коэффициент корреляции	Т-критерий	Корреляция
Рекуперированная электроэнергия – температура окружающего воздуха	0,4	8,59	Присутствует
Рекуперированная электроэнергия – влажность воздуха	–0,27	5,52	Присутствует
Рекуперированная электроэнергия – атмосферное давление	–0,03	0,59	Отсутствует
Рекуперированная электроэнергия – скорость ветра	–0,06	1,18	Отсутствует
Рекуперированная электроэнергия – осадки	0,05	0,98	Отсутствует

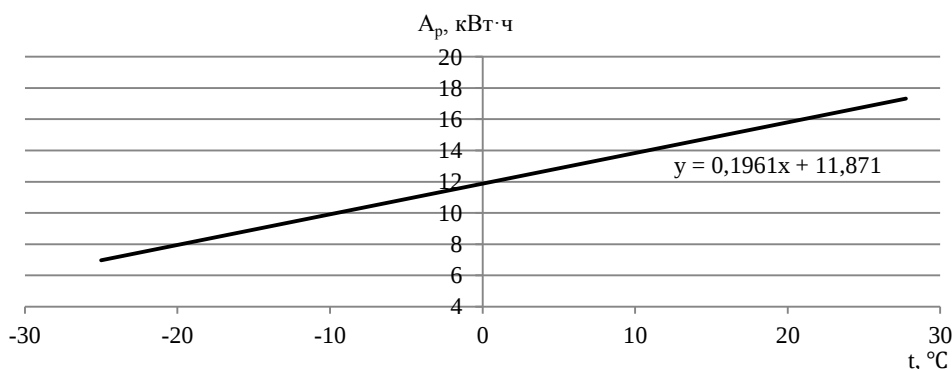


Рис. 2. Зависимость объёма рекуперированной электроэнергии от температуры окружающего воздуха

Одним фактором, влияющим на объём рекупируемой электроэнергии, является температура окружающего воздуха, а вторым – день недели. Поэтому принято решение об использовании двухфакторного дисперсионного анализа без повторений для сравнения однородности объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку, в разные дни недели.

Сформирована пара гипотез: нулевая гипотеза об однородности объёма рекупируемой электроэнергии в разные дни недели и конкурирующая – о его неоднородности.

Второй парой гипотез явились гипотезы об однородности и неоднородности объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку, при разной температуре наружного воздуха.

Для проведения анализа данные об объёме рекупируемой электроэнергии были разбиты на группы по величине температуры окружающего воздуха. В табл. 3 показана форма, использовавшаяся для расчётов. В ячейки таблицы занесены средние данные об объёме электроэнергии, рекупируемой за поездку.

Таблица 3

Форма таблицы для дисперсионного анализа

		Уровень j фактора В				Среднее y_i
		1	2	...	q	
Уровень i фактора А	1	y11	y12	...	y1q	y1
	2	y21	y22	...	y2q	y2
	...	...	...	...	...	...
	h	yh1	yh2	...	yhq	yh
Среднее y_j		y1	y2	...	yq	y

Данные расчёты предусматривают определение наблюдаемого значения F-критерия, которое сравнивается с критическим. Если F-критерий меньше критического, то принимается нулевая гипотеза, если больше – конкурирующая.

Наблюдаемое значение критерия определяется как [9]:

$$F_A = \frac{S_A^2}{S_R^2};$$

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_R^2},$$

где S_A^2 , S_B^2 – дисперсия между уровнями фактора А, В; S_R^2 – остаточная дисперсия.

По итогам вычислений принята нулевая гипотеза, свидетельствующая о том, что объём рекупируемой электроэнергии однороден в разные дни недели. Следовательно, населённость электропоезда не оказывает значимого влияния на объём рекупируемой электроэнергии.

При проверке второй пары принята альтернативная гипотеза, подтверждающая правильность вывода о значимом влиянии температуры окружающего воздуха на объём рекупируемой электроэнергии.

Для оценки зависимости объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку, от квалификации машиниста общая выборка была поделена на частные выборки по классам квалификации машинистов. Так как основным фактором, от которого зависит объём рекупируемой электроэнергии, как это установлено выше, является температура наружного воздуха, на рис. 3 показана зависимость объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку, от данного фактора для различных классов машинистов.

Аналогично, с использованием дисперсионного анализа, сравнен объём электроэнергии, рекупируемой за поездку, для машинистов различных классов квалификации. По итогам принята альтернативная гипотеза, т.е. объём электроэнергии, рекупируемой машинистами разных классов квалификации, неоднороден. Причём, как видно из графика, наиболее эффективно режим рекуперации используется машинистами 2-го класса квалификации.

Для рассмотрения объёма электроэнергии, рекупируемой машинистами одного класса квалификации, из выборки были отобраны машинисты, совершившие наибольшее количество поездок. Для первого класса квалификации найдены 2 таких машиниста с количеством поездок 7 и 6. Зависимость объёма рекупируемой электроэнергии от индивидуальной квалификации машиниста показана на рис. 4.

По аналогии с двухфакторным дисперсионным анализом без повторений, сформированы нулевая и конкурирующая гипотезы об однородности и неоднородности объёма электроэнергии, рекупируемой машинистами одного класса квалификации.

Проверка гипотезы выполнена с использованием критерия Фишера [10]

$$F = \frac{S_x^2}{S_y^2},$$

где S_x^2 – большая приведённая выборочная дисперсия; S_y^2 – меньшая приведённая выборочная дисперсия.

После этого полученное значение критерия Фишера сравнено с критическим. По итогам расчётов принята альтернативная гипотеза, т.е. объём электроэнергии, рекупируемой за поездку двумя рассмотренными машинистами одного класса квалификации, не является однородным.

По описанному выше принципу из выборки были отобраны маршрутные листы с электропоездами, выполнившими наибольшее количество поездок. Всего было выбрано 5 электропоездов, совершивших 29, 33, 28, 25 и 22 поездки. На рис. 5 показана зависимость объёма электроэнергии, рекупируемой за поездку, от температуры окружающего воздуха для различных электропоездов.

По итогам двухфакторного дисперсионного анализа без повторений принята альтернативная гипотеза, т.е. объём электроэнергии, рекупируемой на разных электропоездах, не является однородным.

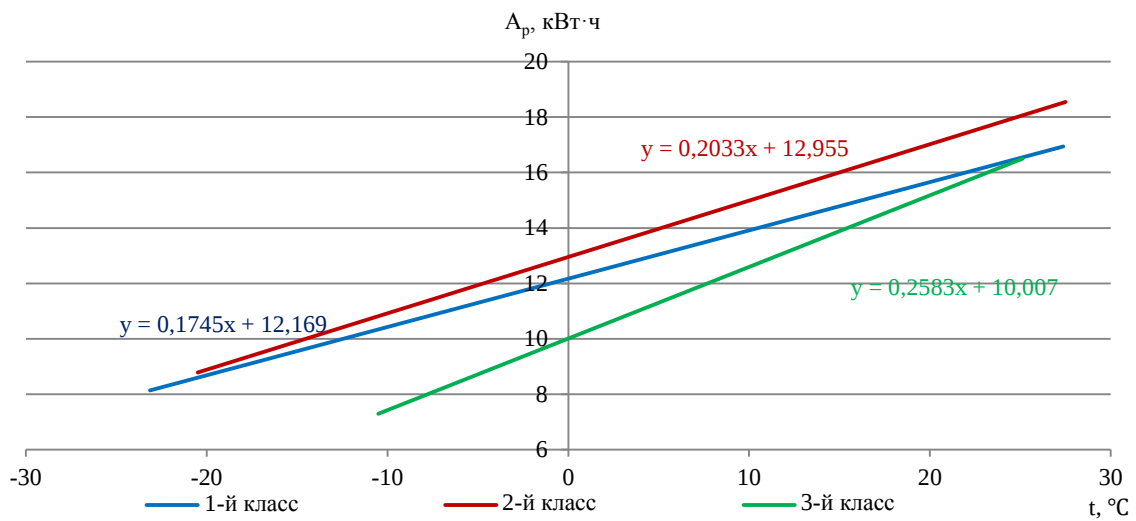


Рис. 3. Сравнение объёма электроэнергии, рекуперированной за поездку, машинистами различных классов квалификации

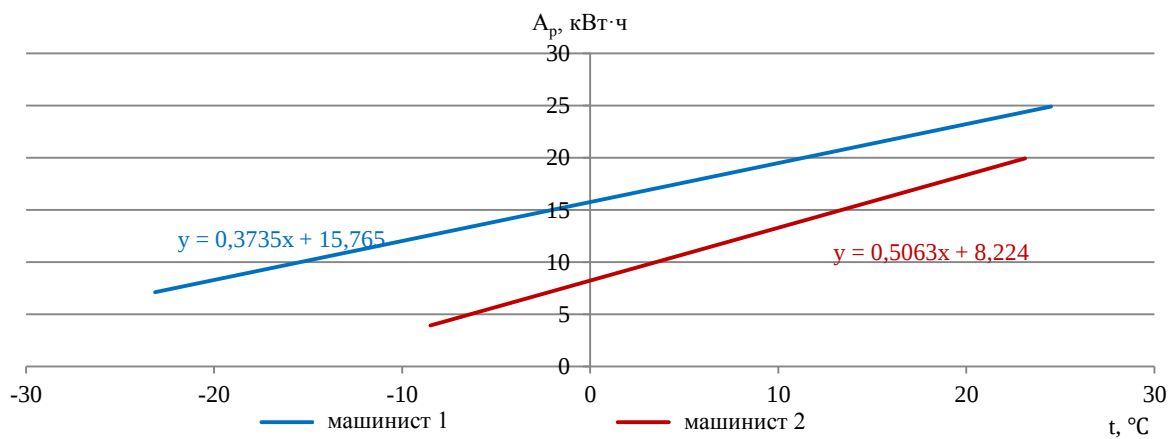


Рис. 4. Сравнение объёма электроэнергии, рекуперированной за поездку, различными машинистами одного класса квалификации

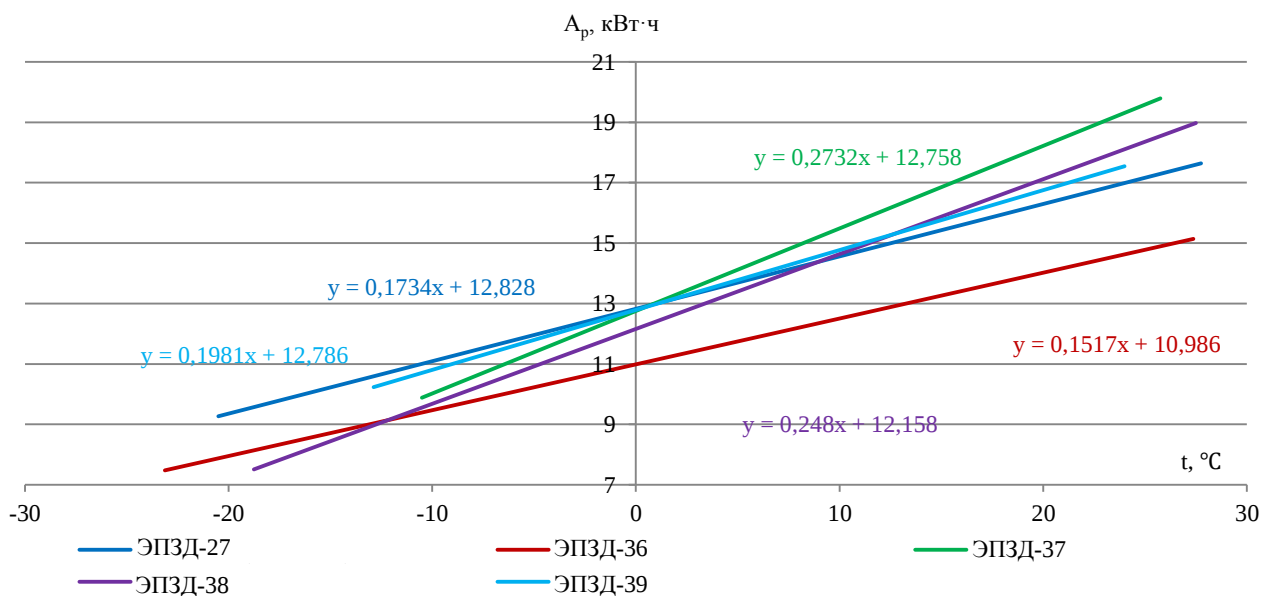


Рис. 5. Сравнение электропоездов по объёму электроэнергии, рекуперированной за поездку

Выводы

1. Главным фактором, который оказывает влияние на объем рекупируемой электроэнергии в пригородном движении, является температура окружающего воздуха.

2. На участке, рассмотренном в исследовании, населенность электропоезда не оказывает значимого влияния на объем рекупируемой электроэнергии.

3. Дополнительное влияние на объем рекупируемой электроэнергии могут оказывать как класс квалификации машиниста, так и его личное мастерство.

4. Также на объем рекупируемой электроэнергии может оказывать влияние техническое состояние электроподвижного состава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маринин С.А. Оценка влияния погодных условий на расход электроэнергии в моторвагонной тяге на примере Горьковской железной дороги // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4. С. 193–200.
2. Шведов А.С. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Издательский дом ГУ ВШЭ, 2005. 254 с.
3. Маринин С.А. Совершенствование системы нормирования энергозатрат в грузовом движении электровозами переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Москва, 2010. 24 с.
4. Погода в Нижнем Новгороде. 2014. URL : <http://weatherarchive.ru/Pogoda/Nizhny%20Novgorod> (дата обращения 16.06.2025).
5. Куликов Е.И. Прикладной статистический анализ. Москва : Горячая линия – Телеком, 2008. 464 с.
6. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2004, 573 с.
7. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава (ред. от 20.11.2023) : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества: протокол от 6–7 мая 2014 г. № 60. Приложение № 18 // СПС «КонсультантПлюс». Последнее обновление: 23.01.2025).
8. Ушаков С.Ю., Вильгельм А.С., Никифоров М.М. Оценка эффективности использования электроэнергии на тягу поездов в границах полигона Московского центрального кольца // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 5. С. 40–49.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 2003. 479 с.
10. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. Москва : Финансы и статистика, 2004. 656 с.

REFERENCES

1. Marinin S.A. Otsenka vliyaniya pogodnykh uslovij na raskhod elektroenergii v motorvagonnoj tyagi na primere Gor'kovskoj zheleznoj dorogi [Assessment of the influence of weather conditions on the energy consumption in railcar traction using the Gorky Railway as an example] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshchenija. 2023. № 4. S. 193–200.
2. Shvedov A.S. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moskva : Izdatel'skij dom GU VShE, 2005. 254 s.
3. Marinin S.A. Sovershenstvovanie sistemy normirovaniya energozatrat v gruzovom dvizhenii elektrovozami peremennogo toka [Improving the system of standardization of energy consumption in freight traffic by AC electric locomotives] : avtoref. dis..... kand. tekhn. nauk : 05.22.07. Moskva, 2010. 24 s.
4. Pogoda v Nizhnem Novgorode [Weather in Nizhny Novgorod]. 2014. URL : <http://weatherarchive.ru/Pogoda/Nizhny%20Novgorod> (data obrashcheniya: 16.06.2024).
5. Kulikov E.I. Prikladnoj statisticheskij analiz [Applied statistical analysis]. Moskva : Goryachaya Liniya – Telecom, 2008. 464 s.
6. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moskva : UNITY-DANA, 2004, 573 s.
7. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (red. ot. 20.11.2023) [Rules for the maintenance of braking equipment and brake control of railway rolling stock (amended on 20.11.2023)] : utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva: protokol ot 6–7 maya 2014 g. № 60. Prilozhenie № 18 // CPS «KonsultantPlus». Poslednee obnovlenie: 23.01.2025.
8. Ushakov S.Yu., Wilhelm A.S., Nikiforov M.M. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na tyagu poezdov v granitsakh poligona Moskovskogo tsentral'nogo kol'tsa [Efficiency assessment of electric power use for train traction within the boundaries of the Moscow Central Circle] // Vestnik transporta Povolzhya. 2019. № 5. S. 40–49.
9. Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moskva : Vysshaya Shkola, 2003. 479 s.
10. Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. Obshchaya teoriya statistiki [General theory of statistics]. Moskva : Finansy i statistika, 2004. 656 s.

Информация об авторах

С.А. Маринин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта».

Information about the author

S.A. Marinin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Engineering and Technology of Railway Transport

Статья поступила в редакцию 13.08.2025; одобрена после рецензирования 06.09.2025; принята к публикации 06.09.2025.
The article was submitted: 13.08.2025; approved after reviewing: 06.09.2025; accepted for publication: 06.09.2025.

Научная статья
УДК 519.216.3, 504.06, 625.096
doi:10.31079/1992-2868-2024-21-4-108-119

ДВУХЭТАПНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВАРИИ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА. ЧАСТЬ I. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Чикир Мария Васильевна

Научно исследовательский центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральское отделение
Российской академии наук, Екатеринбург, Россия, mary-catchikir2012@yandex.ru

Аннотация. Исследование посвящено влиянию природных рисков на работу железнодорожных объектов с применением языка программирования Python и сетевой модели в ПК GeNIe Modeler. Презентация этой работы разделена на две части. В части I (текущая статья) представлены результаты исследовательского анализа реальных данных (exploratory data analysis, EDA), направленного на изучение природно-климатических факторов, их взаимосвязи и вклада в развитие железнодорожной аварии. EDA обеспечил поддержку данными для количественной оценки рисков второй части исследования. В части II предложена модель сети Байеса для оценки ущерба аварий на железной дороге, вызванных природными событиями, с последующим байесовским анализом. Результаты исследования показывают, что природно-климатические факторы могут вызывать серьезные сбои в работе железнодорожного транспорта, а при участии опасных грузов создавать условия для развития каскадных аварий. Разработанная байесовская модель может быть использована при комплексном планировании и управлении железнодорожной системой во время природных катаклизмов.

Ключевые слова: анализ данных, оценка риска, железнодорожная авария, вероятность аварии, климатические изменения

Original article

TWO-STAGE MODELING OF A RAILWAY ACCIDENT OF THE NATURAL CHARACTER. PART I. EXPLORATORY DATA ANALYSIS

Chikir Maria V.

Science and Engineering Centre «Reliability and Safety of Large Systems and Machines», Ural Branch, Russian academy of Sciences, Stencheskaya, 54-A, Yekaterinburg, Russia, mary-catchikir2012@yandex.ru

Abstract. The study is devoted to the natural risk impact on the operation of railway industry facilities using a Bayesian network model in the GeNIe Modeler software package and the Python programming language. The presentation of this work is divided into two parts. Part I (current article) presents the exploratory data analysis results (EDA) aimed at studying natural and climatic factors, their interrelationship and contribution to the railway accident development. The EDA provided data support for quantitative risk assessment of the further study. In Part II, a Bayesian network model is proposed to assess the railway damage caused by natural events, followed by Bayesian analysis. The results show that natural and climatic factors can cause serious disruptions in the operation of railway transport, and create conditions for developing cascading accidents in the case of dangerous goods. The developed Bayesian model can be used in integrated planning and railway system management during natural disasters.

Keywords: data analysis, assessment risk, railway accident, probability accident, climate change

Введение

Железные дороги играют ключевую роль в городских перевозках, и для поддержания их работоспособности активно применяются современные технологии. Однако железнодорожный транспорт более подвержен природным рискам по сравнению с другими видами транспорта, так как он менее гибок в пространственном отношении [1].

Проблеме природно-климатического влияния на работоспособность железной дороги посвящено множество исследований. В работе [2] исследовали состояние железнодорожной сети Нидерландов под действием экстремальных температур и снегопадов; в [3] – проведен пространственный анализ сезонных паводков для станций, мостов и переездов

штата Айова США. Зависимость работоспособности персонала железной дороги Сербии от погодных условий изучалась в [4]. Эти исследования показывают, что оценка природных рисков в регионах, подверженных экстремальным погодным условиям, имеет большое значение для безопасности железных дорог.

Работоспособность железнодорожного транспорта зависит не только от однократного воздействия природы, но и от ежедневного влияния климата на элементы путей, составов, различного железнодорожного оборудования и обслуживающей инфраструктуры. В странах с обширной территорией маршруты следования пролегают в нескольких природных зонах, поэтому оборудование может испытывать большие температурно-влажностные

перепады. Несмотря на время суток, сезонность и погодные условия, движение поездов должно осуществляться бесперебойно. Для сохранения его регулярности важно учитывать и локальное природное воздействие на железнодорожное оборудование, и климатические изменения в целом.

Цель данной статьи (часть I) – выполнение EDA в программной среде Python для изучения и отбора данных, связанных с железнодорожными авариями природно-климатического характера. Результаты обработки используются для определения параметров априорного распределения целевой переменной «Общая стоимость ущерба» и в качестве входных данных для первичной байесовской модели, устанавливающей тип природной аварии на железной дороге и величину ее возможного ущерба (часть II статьи).

Влияние климата на функционирование железной дороги

Железная дорога постоянно находится под влиянием многочисленных факторов риска, из которых почти все неустраняемы. К природным факторам относятся геологические (оползни, сели), гидрологические явления (наводнения, цунами), природные пожары и др. [5]. Природные риски практически не поддаются управлению; их можно только анализировать и оценивать количественно.

Роль природно-климатического воздействия в возникновении железнодорожной аварии можно быть различной. В одном случае воздействие будет первопричиной (обвал насыпи, разрушение путей и сход состава с рельсов), в другом – катализатором распространения основных поражающих факторов (разгерметизация цистерны с токсичным грузом, распространение токсичного облака из-за неблагоприятных метеоусловий). В данной работе рассматривается первый случай. Нельзя упускать из внимания, что природно-климатическое воздействие может вступать в сочетание с техническими, организационными и другими причинами. Возникает синергетический эффект, при котором результат взаимодействия двух и более факторов существенно больше воздействия каждого отдельного фактора. Принцип суперпозиции факторов здесь неприменим.

Существующие меры борьбы с воздействием климата разрабатываются в глобальном масштабе и могут быть бесполезны на региональном и местном

уровне. Часто они не учитывают социально-экономические возможности, ограниченность ресурсов, географические и климатические особенности конкретной территории. Ситуация усугубляется при халатном отношении персонала, износе оборудования.

Доступность данных

Регистрация железнодорожных аварий как результата природно-климатических воздействий в России не ведется. Поэтому существуют ограничения в сборе информации о состоянии железных дорог [6–10]. Байесовский подход делает возможным объединение частотных данных со знаниями предметной области. Числовые значения вероятностей могут извлекаться из баз данных, опираться на экспертное заключение или определяться их комбинацией.

В исследовании использован набор данных (dataset, далее – датасет) по зарубежным авариям [11] с 1975 по 2022 г.г., разнообразных и широких по объему. Значительная часть этой информации не структурирована и содержит разные типы данных. Столбцы в наборе данных соответствуют переменным – факторам аварий (будущим узлам сети Байеса), а строки (записи) – различным значениям этих переменных. В работе применялось несколько библиотек Python: Numpy, Scipy и Pandas (обработка и анализ данных), Matplotlib и Seaborn (визуализация данных и их зависимостей), PyMC3 (байесовское моделирование и вероятностное программирование), Arviz (анализ результатов байесовского анализа) и др.

Исходный датасет содержит 215 849 строк и 160 столбцов, из которых 68 столбцов являются числовыми и 92 – объектными. Объектные столбцы хранят строковый, или смешанный, тип данных (рис. 1).

Представленный набор не связан напрямую с регистрацией природных аварий (всего 14 % от общего числа). На этапе предобработки были выбраны признаки, зависящие от природно-климатических факторов или более всего объясняющие поведение целевой переменной. Существует 17 признаков-факторов аварии: месяц аварии, тип аварии, опасные вагоны, эвакуированные люди, видимость, погодные условия, тип трассы, общий тоннаж, сошедшие с рельсов груженные грузовые и пассажирские вагоны, стоимость повреждения пути и др. (рис. 2).

Accident Number	PDF Link	Accident Year	Accident Month	Other Railroad Code	Other Railroad Name	Other Accident Number	...	Other Railroad SMT Grouping	Other Parent Railroad company code	Other Parent Railroad company Name	Other Railroad Holding Company
N1700013	https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/...	17.0	6.0	NaN	NaN	NaN	...	NaN	NaN	NaN	NaN
201707188	https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/...	17.0	6.0	NICD	Northern Indiana Commuter Transportation District	N1700013	...	SMT-4 - CP/CN/CCD	NICD	Northern Indiana Commuter Transportation District	Not Assigned

Рис. 1. Исходный набор данных

```
df['причина аварии'].replace({'Snow, ice, mud, gravel, coal, sand, etc. on track': 'Снег, лед, грязь и т.д. на трассе',  
'Extreme environmental condition - TORNADO': 'ТОРНАДО',  
'Extreme environmental condition - FLOOD': 'НАВОДНЕНИЕ',  
'Extreme environmental condition - EXTREME WIND VELOCITY': 'ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА',  
'Washout/rain/slide/flood/snow/ice damage to track': 'Размыв, дождь, оползень',  
'Other extreme environmental conditions (Provide detailed description in narrative)': 'Др. экстремал. условия окр. среды',  
'Highway user inability to stop due to extreme weather conditions (dense fog, ice or snow packed road)': 'Густой туман, гололед или заснеженная дорога'}),  
inplace=True)
```

Рис. 2. Фильтр аварий по природному фактору

Пропуски

При соотношении количества записей видно, что данные содержат пропуски, которые могли возникнуть из-за ошибок при регистрации аварий, неточностей или намеренного умалчивания ответственных лиц. Наличие пропусков не позволит выполнять любые преобразования данных. Замена их средним, наиболее частотным или внутригрупповым значением может привести к потере исходных связей между переменными.

Для оценки полноты исходного датасета использовалась библиотека `missonigno`. Матрица пропущенных значений (рис. 3) дает представление о расположении отсутствующих значений и закономерностях между ними. Больше всего пропусков содержится в переменной «Тип трассы», в остальных столбцах их совсем немного. Распределение пропусков внутри каждого признака выглядит случайным, так как не наблюдается связь между пропусками разных столбцов. Линия справа указывает на записи с максимальным и минимальным количеством значений NaN. Большинство значений отсутствует во второй половине набора.

Распределение пропусков для столбца «Тип трассы» показывает, что больше всего пропущенных значений приходится на момент начала реги-

страции (рис. 4). Можно предположить, что это связано с усовершенствованием баз данных и более строгой классификацией аварий в настоящее время.

По результатам анализа полноты данных выполнено построчное удаление пропущенных значений, а также дубликатов, недопустимых нулевых и символьных значений. Все числовые параметры были унифицированы согласно Международной системе единиц, а текстовые – переведены на русский язык. Рисунок 5 содержит фрагмент кода для фильтрации данных, рис. 6 – датафрейм после обработки.

Анализ основных свойств данных

Пик природных аварий на железной дороге приходится на конец 80-х гг. прошлого века (рис. 7). В настоящее время уровень аварий значительно ниже, но тенденция последних 20 лет остается на прежнем уровне.

Категориальные ранговые переменные

Качественными переменными являются признаки «Видимость», «Погодные условия», «Месяц аварии», «Тип трассы», «Причина аварии», «Тип аварии». Столбчатые диаграммы и использование соответствующих методов указывают на наличие нескольких уникальных категорий (табл. 1).

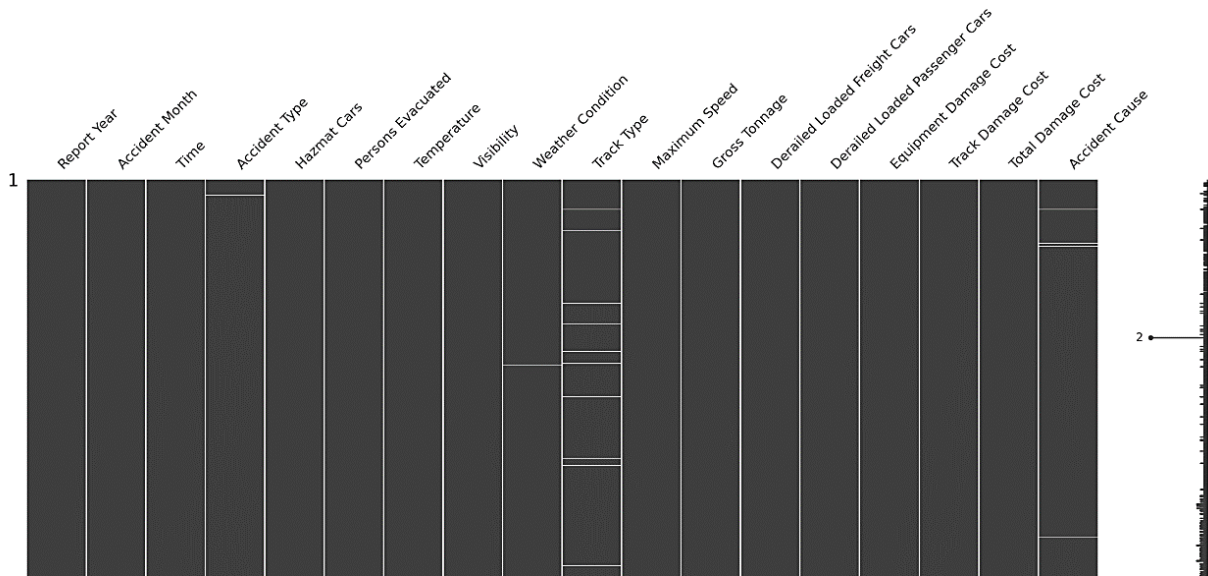


Рис. 3. Матрица пропущенных значений

ДВУХЭТАПНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВАРИИ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА. ЧАСТЬ I. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

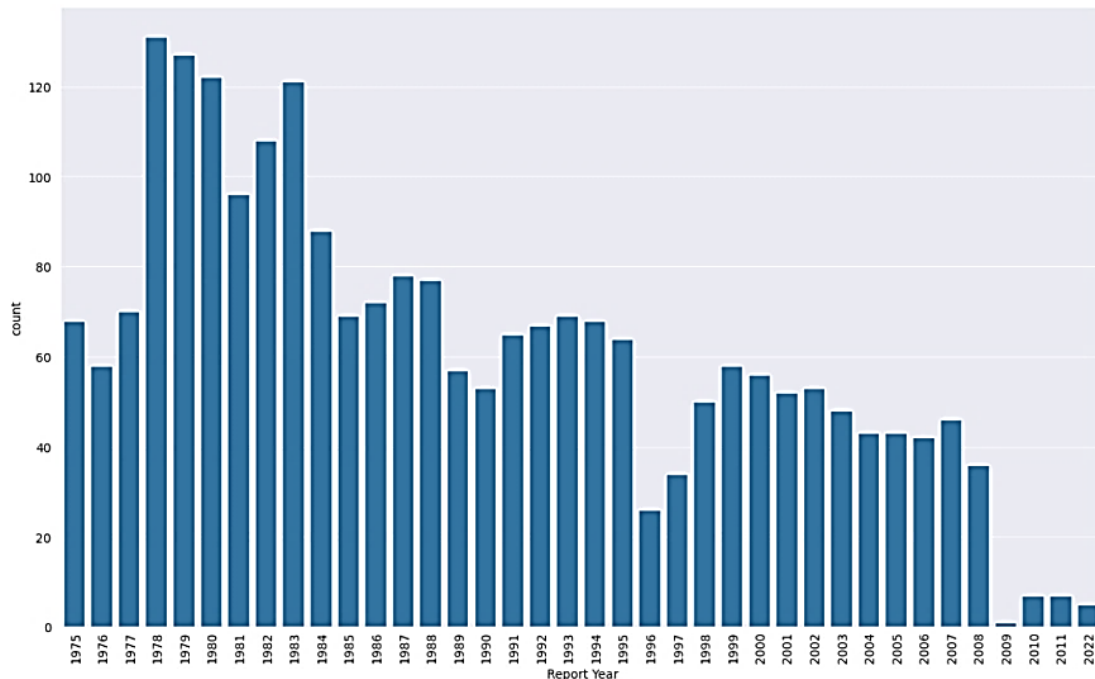


Рис. 4. Распределение пропущенных значений переменной «Тип трассы» по годам

```
#Избавляемся от символьной запятой в значениях столбцов и переводим их в формат с плавающей запятой
DF['Общий тоннаж'] = DF['Общий тоннаж'].apply(lambda x: ''.join(x.split(',')))
DF['Стоимость повреждения оборудования'] = DF['Стоимость повреждения оборудования'].apply(lambda x: ''.join(x.split(',')))
DF['Стоимость повреждения пути'] = DF['Стоимость повреждения пути'].apply(lambda x: ''.join(x.split(',')))
DF['Общая стоимость ущерба'] = DF['Общая стоимость ущерба'].apply(lambda x: ''.join(x.split(',')))
DF = DF.astype({"Общий тоннаж": "float", "Стоимость повреждения оборудования": "float", "Стоимость повреждени

#Перевод стоимостей из доллары в рубли (на сто миллионов 100 000 000)
DF['Общая стоимость ущерба'] = DF['Общая стоимость ущерба'].apply(lambda x: x*90.0/100000000)
DF['Стоимость повреждения оборудования'] = DF['Стоимость повреждения оборудования'].apply(lambda x: x*90.0/
DF['Стоимость повреждения пути'] = DF['Стоимость повреждения пути'].apply(lambda x: x*90.0/100000000)
```

Рис. 5. Процесс предобработки данных

Тип аварии	Опасные вагоны	Эвакуированные люди	Температура	Видимость	Погодные условия	Тип трассы	Максимальная скорость	Общий тоннаж	Соединение с рельсов грузовые вагоны	Соединение с рельсов грузовые пассажирские вагоны	Стоимость повреждения оборудования	Стоимость повреждения пути	общая стоимость ущерба	Причина аварии
Другие столкновения	0.0	0	2.22	День	Ясно	Железнодорожная магистраль	40	0.0	0.0	0.0	0.016603	0.000000	0.016603	Снег, лед, грязь и т.д. на трассе
Препятствие	0.0	0	-5.00	Ночь	Ясно	Железнодорожная магистраль	40	2847.0	0.0	0.0	0.066120	0.000000	0.066120	Снег, лед, грязь и т.д. на трассе
Сход с рельсов	1.0	0	1.67	День	Облачно	Железнодорожная магистраль	35	9338.0	12.0	0.0	1.022559	0.854787	1.877346	ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА
Другие столкновения	0.0	0	12.78	День	Ясно	Сортировочная станция	10	0.0	0.0	0.0	0.005858	0.000000	0.020588	ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА
Другие столкновения	0.0	0	12.78	День	Ясно	Сортировочная станция	10	0.0	0.0	0.0	0.014729	0.000000	0.020588	ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА

Рис. 6. Датафрейм железнодорожных аварий по природно-климатическим факторам

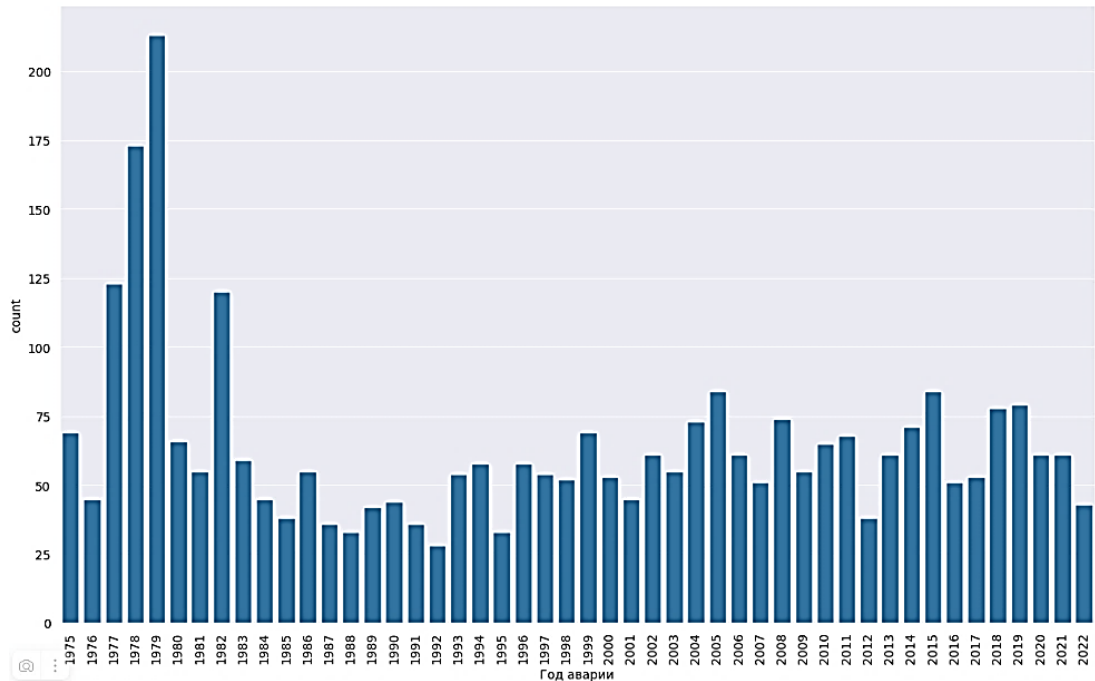


Рис. 7. Распределение аварий по годам

Таблица 1

Характеристика качественных переменных

Гистограмма Видимость	Таблица уникальных значений #Кол-во случаев (строчек) каждой причины DF['Причина аварии'].value_counts() <table><thead><tr><th>Причина аварии</th><th>count</th></tr></thead><tbody><tr><td>Снег, лед, грязь и т.д. на трассе</td><td>1243</td></tr><tr><td>Размыв, дождь, оползень</td><td>750</td></tr><tr><td>ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА</td><td>523</td></tr><tr><td>Др.экстремал.условия окр.среды</td><td>395</td></tr><tr><td>НАВОДНЕНИЕ</td><td>172</td></tr></tbody></table>	Причина аварии	count	Снег, лед, грязь и т.д. на трассе	1243	Размыв, дождь, оползень	750	ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА	523	Др.экстремал.условия окр.среды	395	НАВОДНЕНИЕ	172												
Причина аварии	count																								
Снег, лед, грязь и т.д. на трассе	1243																								
Размыв, дождь, оползень	750																								
ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ВЕТРА	523																								
Др.экстремал.условия окр.среды	395																								
НАВОДНЕНИЕ	172																								
Погодные условия	#Кол-во случаев (строчек) каждого типа трассы DF['Тип трассы'].value_counts() <table><thead><tr><th>Тип трассы</th><th>count</th></tr></thead><tbody><tr><td>Железнодорожная магистраль</td><td>1575</td></tr><tr><td>Сортировочная станция</td><td>1043</td></tr><tr><td>Промышленная железная дорога</td><td>319</td></tr><tr><td>Запасной железнодорожный путь</td><td>146</td></tr></tbody></table>	Тип трассы	count	Железнодорожная магистраль	1575	Сортировочная станция	1043	Промышленная железная дорога	319	Запасной железнодорожный путь	146														
Тип трассы	count																								
Железнодорожная магистраль	1575																								
Сортировочная станция	1043																								
Промышленная железная дорога	319																								
Запасной железнодорожный путь	146																								
Месяц аварии	#Кол-во случаев (строчек) каждого типа аварии DF['Тип аварии'].value_counts() <table><thead><tr><th>Тип аварии</th><th>count</th></tr></thead><tbody><tr><td>Сход с рельсов</td><td>2295</td></tr><tr><td>Другие столкновения</td><td>268</td></tr><tr><td>Другие (описаны в описании)</td><td>170</td></tr><tr><td>Препятствие</td><td>152</td></tr><tr><td>Боковое столкновение</td><td>131</td></tr><tr><td>Столкновение на повороте</td><td>34</td></tr><tr><td>Столкновение сзади</td><td>16</td></tr><tr><td>Пожар/сильный разрыв</td><td>8</td></tr><tr><td>Лобовое столкновение</td><td>5</td></tr><tr><td>Столкновение с остановившимся поездом</td><td>3</td></tr><tr><td>Взрыв-детонация</td><td>1</td></tr></tbody></table>	Тип аварии	count	Сход с рельсов	2295	Другие столкновения	268	Другие (описаны в описании)	170	Препятствие	152	Боковое столкновение	131	Столкновение на повороте	34	Столкновение сзади	16	Пожар/сильный разрыв	8	Лобовое столкновение	5	Столкновение с остановившимся поездом	3	Взрыв-детонация	1
Тип аварии	count																								
Сход с рельсов	2295																								
Другие столкновения	268																								
Другие (описаны в описании)	170																								
Препятствие	152																								
Боковое столкновение	131																								
Столкновение на повороте	34																								
Столкновение сзади	16																								
Пожар/сильный разрыв	8																								
Лобовое столкновение	5																								
Столкновение с остановившимся поездом	3																								
Взрыв-детонация	1																								

Переменные «Месяц аварии» и «Тип аварии» высоко кардинальны, т.е. обладают достаточно большим количеством уникальных категорий (12 месяцев и 11 типов аварий). Высокая кардинальность может в дальнейшем привести к разреженности данных, однако, рассматриваемые признаки пока оставлены без изменений.

Некоторые категориальные признаки являются ранговыми (кроме признаков временных рядов «Год, время и месяц аварии»). Изначально переменные с категориями скрыты под типом float или object. Тип данных таких признаков был принудительно изменен на category с указанием порядка категорий. Кодирование категорий выполнено при помощи класса Ordinal Encoding библиотеки sklearn в силу наличия внутренней иерархии между возможными состояниями (рис. 8).

Категориальные номинальные переменные

Признаки «Причина аварии», «Тип аварии» занимают промежуточное положение между порядковыми и номинальными переменными, содержат 5 и 11 состояний соответственно. Они частично обладают внутренней иерархией, но проранжировать их категории непросто. Например, для признака «Тип аварии» гораздо сложнее определить, какой из видов столкновений «хуже» – «Столкновение сзади», «Боковое столкновение», «Столкновение на повороте» и др. Для сравнения номинальных признаков с остальными переменными они также должны быть закодированы.

Класс One-Hot Encoding преобразует номинальные переменные в бинарные матрицы с новыми столбцами по количеству уникальных состояний переменной. Применение такого кодирования повысит размерность датасета в несколько раз (14 новых столбцов), тем самым создав сложности при анализе корреляций. Сравнить количественные, ранговые и номинальные переменные, даже если они закодированы соответствующим образом, затруднительно:

- каждый тип переменных требует использования соответствующего коэффициента корреляции, многие из которых несимметричны (т.е. $X \rightarrow Y \neq Y \rightarrow X$);
- чем больше категорий у номинальных переменных, тем сложнее интерпретировать их зависимость с другими переменными.

Поэтому признаки «Причина аварии», «Тип аварии» рассматривались как порядковые переменные и кодировались при помощи класса Ordinal Encoding.

Визуальное сравнение качественных признаков

Для выявления скрытых закономерностей между качественными признаками были построены столбчатые диаграммы на основе таблиц сопряженности. Они позволили визуальное и качественно оценить самые распространенные комбинации признаков в данных.

Самым распространённым типом аварии стал «Сход с рельсов», после – различные типы столкновений и препятствия на пути следования. Большинство аварий произошло в условиях ограниченного освещения – ночью или на рассвете (рис. 9).

Серьезным фактором риска сходов стало выпадение снега. В то же время достаточно много инцидентов произошло в ясный и облачный день (рис. 10). На наиболее критичных участках железной дороги (железнодорожная магистраль и сортировочная станция) снег, лед, высокая скорость ветра и наводнения вызвали от 100 до 500 аварий. Часть причин (бордовая полоса на столбчатой диаграмме рис. 11) не идентифицировано.

Количественные переменные

Количественными признаками являются переменные «Температура», «Максимальная скорость», «Опасные вагоны», «Эвакуированные люди», «Общий тоннаж», «Сошедшие с рельсов груженные пассажирские вагоны», «Сошедшие с рельсов груженные пассажирские вагоны», «Стоимость повреждения оборудования», «Стоимость повреждения пути», «Общая стоимость ущерба». Признаки «Температура», «Максимальная скорость», «Опасные вагоны», «Общий тоннаж» отобраны как возможные факторы железнодорожной аварии, а переменная «Общая стоимость ущерба» – как целевая. Характер распределения выделенных переменных был изучен при помощи совместного изображения гистограммы для выявления полимодальности и boxplot – для проверки признаков на наличие выбросов.

Видимость	Погодные условия	Тип трассы	Максимальная скорость	Общий тоннаж	Сошедшие с рельсов груженные вагоны	Сошедшие с рельсов груженные пассажирские вагоны	Стоимость повреждения оборудования	Стоимость повреждения пути	Общая стоимость ущерба	Причина аварии	Температура *С
0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.016603	0.000000	0.016603	1.0	1.0
3.0	0.0	3.0	1.0	2847.0	0.0	0.0	0.066120	0.000000	0.066120	1.0	2.0
0.0	1.0	3.0	0.0	9338.0	12.0	0.0	1.022559	0.854787	1.877346	2.0	1.0
0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.005858	0.000000	0.020588	2.0	1.0
0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.014729	0.000000	0.020588	2.0	1.0

Рис. 8. Датафрейм после кодирования данных

TWO-STAGE RAILWAY ACCIDENT MODELING OF A NATURAL NATURE.
PART I. EXPLORATORY DATA ANALYSIS

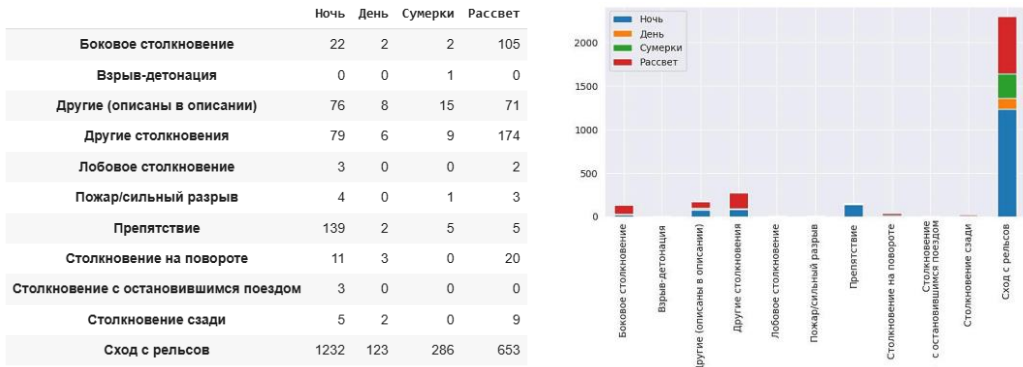


Рис. 9. Сравнение признаков «Тип аварии» и «Видимость»

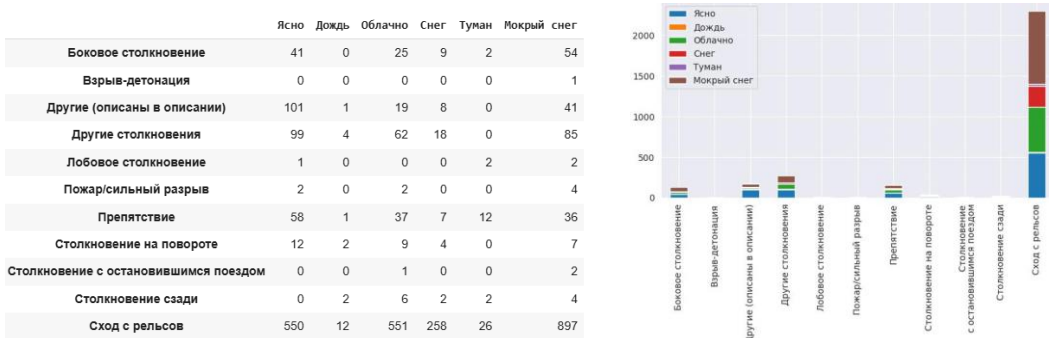


Рис. 10. Сравнение признаков «Тип аварии» и «Погодные условия»

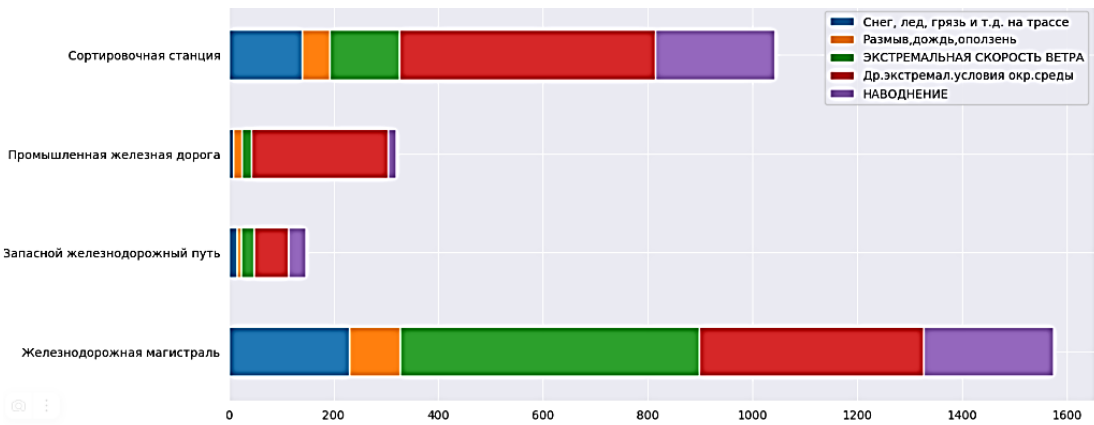


Рис. 11. Сравнение признаков «Тип трассы» и «Причина аварии»

Признак «Температура» не содержит выбросов, а его распределение на рис. 12 – полимодально (имеет несколько мод). Переменная «Максимальная скорость» содержит выбросы, связанные со значениями скоростей 60–100 км/ч (см. на значения за пределами «усов» boxplot). То же наблюдается у переменных «Общий тоннаж» и «Опасные вагоны». Эти признаки имеют слишком большой разброс значений, множество аномальных. Это связано с особенностями регистрации аварий. Обычно пассажирский поезд состоит из 16–20 вагонов, а грузовой – около 70. Редко, в целях повышения рентабельности перевозок, уменьшения количества оборудования и другого используются очень длин-

ные поезда. Вероятно, записи датасета с участием более 80 опасных вагонов подразумевают столкновение нескольких поездов и суммируют характеристики всех вагонов-участников аварии. Процедура логарифмирования не улучшила отображение графика. Наблюдается явная масштабная инвариантность, как для степенных распределений (рис. 13).
Признаки «Температура» и «Максимальная скорость» с исходным типом float и object были дискретизированы, а затем разбиты на категории с назначением типа category для удобства построения байесовской модели. Рисунок 14 показывает фрагмент датасета после окончательной предварительной обработки.

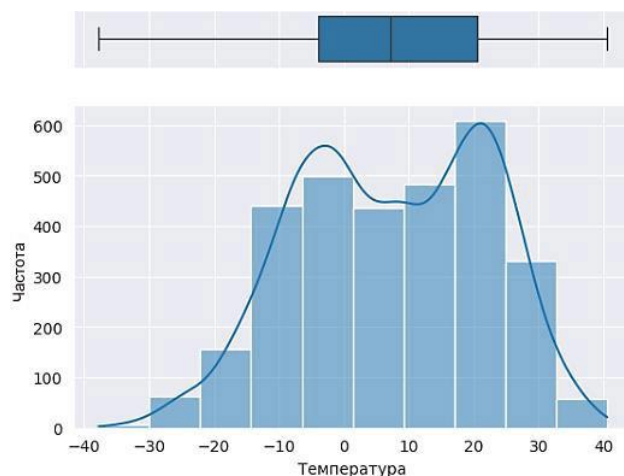


Рис. 12. Распределение признака «Температура»

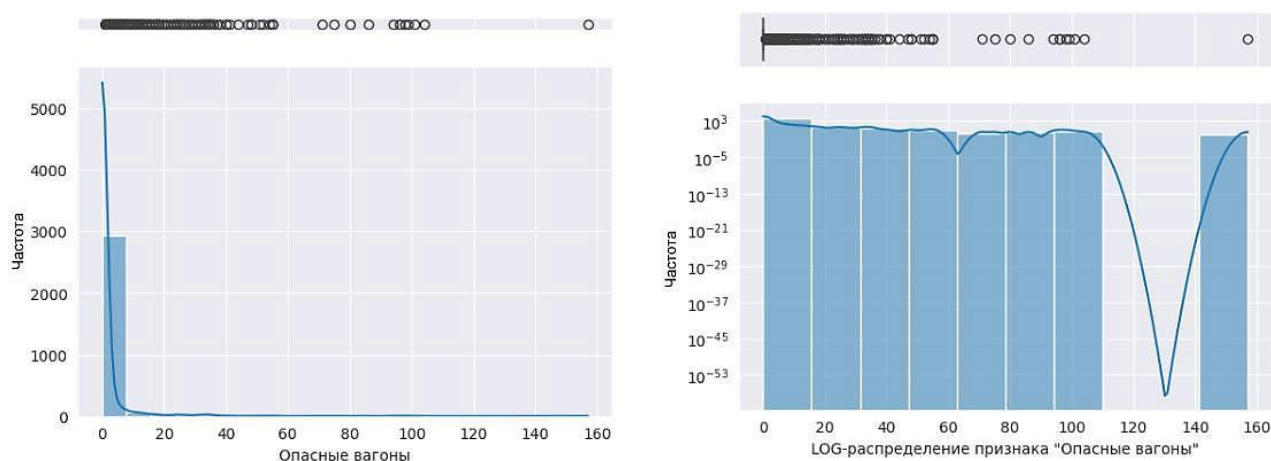


Рис. 13. Распределение признака «Опасные вагоны» в стандартной и логарифмической шкалах

Максимальная скорость	Общий тоннаж	Сошедшие с рельсов грузовые вагоны	Сошедшие с рельсов пассажирские вагоны	Стоимость повреждения оборудования	Стоимость повреждения пути	Общая стоимость ущерба	Причина аварии	Температура *С
От 40 до 60	0.0	0.0	0.0	0.016603	0.000000	0.016603	1.0	Прохладно - от 0°C до 20°C
От 40 до 60	2847.0	0.0	0.0	0.066120	0.000000	0.066120	1.0	Мороз - ниже 0°C
Меньше 40	9338.0	12.0	0.0	1.022559	0.854787	1.877346	2.0	Прохладно - от 0°C до 20°C
Меньше 40	0.0	0.0	0.0	0.005858	0.000000	0.020588	2.0	Прохладно - от 0°C до 20°C
Меньше 40	0.0	0.0	0.0	0.014729	0.000000	0.020588	2.0	Прохладно - от 0°C до 20°C

Рис. 14. Датафрейм после дополнительного кодирования количественных признаков

Анализ целевой переменной

Распределение целевой переменной «Общая стоимость ущерба» имеет нестандартный вид (рис. 15). При выводе статистических метрик наблюдается колоссальный разброс значений. Результат метода describe показывает, что среднее значение примерно

в 10 раз выше медианы (второй квартиль), поэтому признак распределен ненормально. Межквартильный размах, разница между минимальным и максимальным значениями говорят о возможном наличии выбросов, скошенности распределения или его полимодальности.

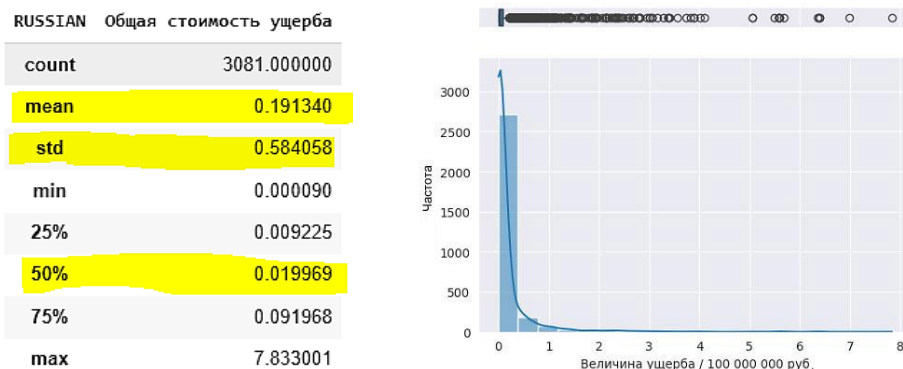


Рис. 15. К оценке распределения целевой переменной «Общая стоимость ущерба»

Гистограмма, совмещенная с boxplot, наглядно демонстрирует, что распределение ущерба характеризуется правосторонней асимметрией и скошено вправо. «Ящик» значительно смещен влево от центра. Значения за пределами «ящика» являются «выбросами» – аварии, ущерб которых превышает медианное значение. Среднее значение крайне «прижато» к началу координат. Несколько точек сильно отклоняются от среднего, группируются слева и образуют длинный хвост по правую сторону, который очень быстро убывает. Высокие значения переменной ущерба разбросаны значительно, чем диапазон низких значений. Другими словами, большая часть наблюдений расположена в диапазоне меньших значений, приходящихся на единственный высокий столбец. Коэффициент асимметрии и эксцесса составили 6,6 и 54,6 соответственно. Это подтверждает ассимитричность распределения и его высокую скошенность вправо.

Распределение является лептокуртическим, т.е. стремящимся к большему количеству экстремальных значений в хвосте по сравнению с распределением Гаусса. При этом наблюдается «ярко» выраженный пик в окрестностях среднего значения. К лептокуртическим распределениям относятся t-распределение Стюдента, распределение Рэлея, распределение Лапласа, экспоненциальное распределение, распределение Пуассона и логистическое распределение. Именно поэтому значения переменной выхода сконцентрированы не около среднего значения, ее распределение имеет «тяжелый хвост». Логарифмическое преобразование не смогло приблизить распределение к нормальному типу. 144 наблюдения «в тяжелом хвосте» имеют колоссальный ущерб, что составляет всего 4,7 % от общего числа аварий.

«Тяжелые хвосты» и принцип большого скачка связаны с философской концепцией Н. Талеба [12]. Она рассматривает труднопрогнозируемые и редкие события, названные «Черными и серыми лебедями».

«Черный лебедь» – внезапное, маловероятное событие, имеющее огромную силу воздействия, предсказать которое невозможно. «Серый лебедь» – событие со значительными последствиями и малой вероятностью, но в некоторой степени предсказуемое. Традиционно для моделирования «лебедей» выбираются распределения «с тяжёлыми хвостами», так как типичные «тонкохвостовые» распределения не могут описать подобные явления [13]. Концепция Н. Талеба находит применение в социальной экономике, страховании, демографии, бизнес-аналитике и теории рисков.

На рис. 16 представлены фрагменты распределения целевой переменной, ни один из которых не подчиняется гауссовому распределению, но внутри каждого прослеживается более плавное изменение величины ущерба. Некоторые из распределений полимодальны.

Для целевой переменной 144 записи из 3083 являются выбросами, которые имеют наименьшую вероятность и колоссальный ущерб, это на много порядков меньше основной доли железнодорожных аварий. Определить, какие выбросы относятся к «черным», а какие – к «серым лебедям», затруднительно. Точных математических определений для данных терминов не существует.

Выделенные наблюдения не являются ошибочными или неверно зарегистрированными, они весьма существенны для анализа рисков, и игнорировать их нельзя. Удаление выбросов из датасета приведет к неверной интерпретации результатов расчета и потере ценной информации. Прогнозирование «черных лебедей» невозможно, а «серых» – возможно только при наличии достаточно глубоких представлений об исследуемой системе и надежной выборке. Поэтому все, что пока можно сделать, – это ограничить подверженность железной дороги к экстремальным природным воздействиям разработкой и внедрением различных технических и организационных мероприятий.

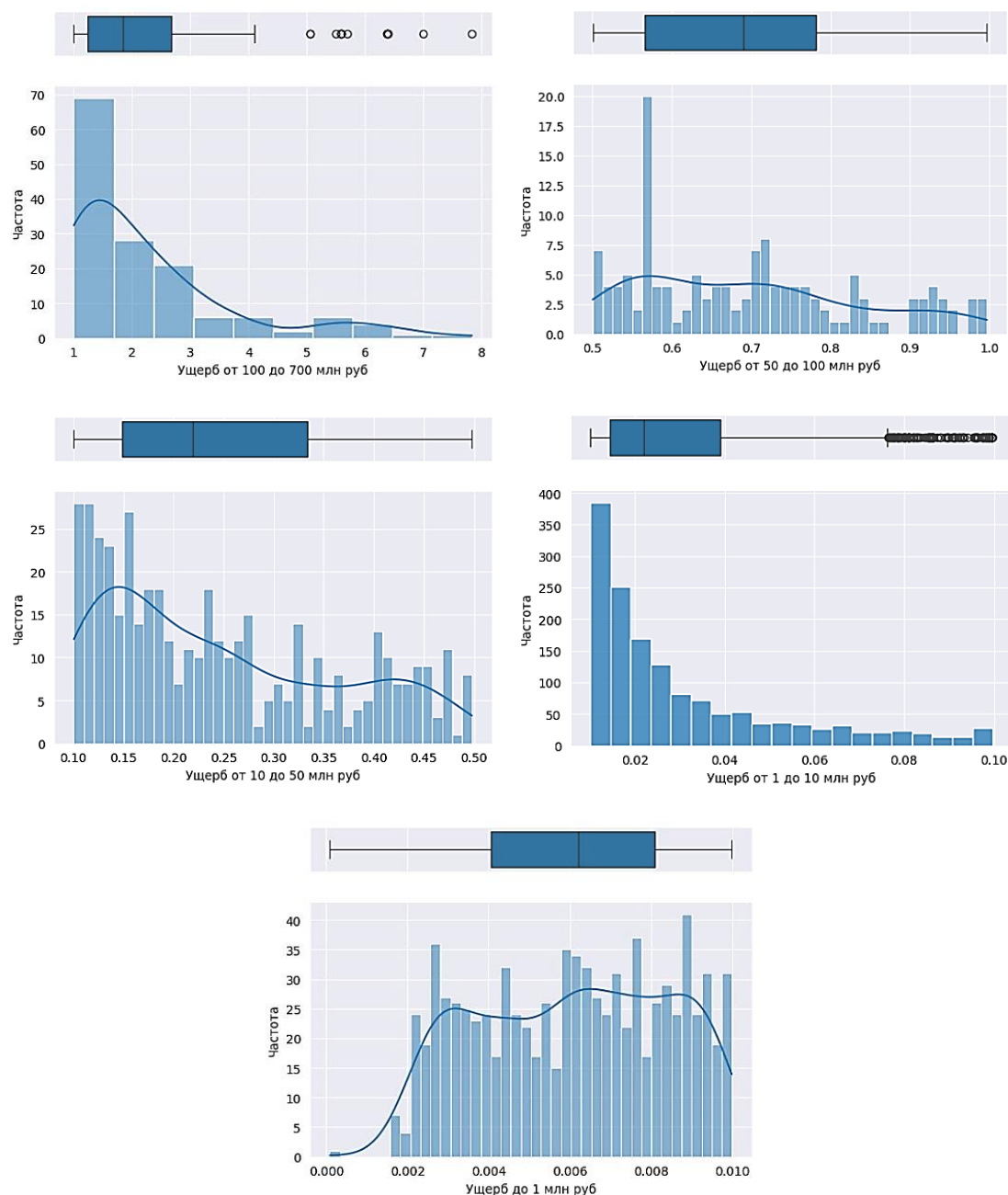


Рис. 16. Фрагменты распределения переменной «Общая стоимость ущерба»

Особенности масштабирования данных

Перед обучением модели машинного обучения требуется масштабирование всех числовых данных. Масштабирование необходимо, когда один признак доминирует над другим по величине, данные имеют разные единицы измерения и диапазоны возможных значений. Когда дисперсии признаков отличаются в разы, то одни признаки начинают доминировать над другими, в результате модель не сможет правильно обучаться. При масштабировании важно сохранить исходные различия и зависимости между признаками, так как они сильно влияют на качество прогноза. Масштабирование позволяет снизить чувствительность модели к масшта-

бу признаков, поэтому обучение становится более быстрым и качественным.

Существует несколько методов масштабирования с некоторыми ограничениями применения (табл. 2). Выбор метода зависит от характера распределения данных, алгоритма машинного обучения, используемого после масштабирования и др. Модели, которые требуют расчета расстояний между объектами, очень чувствительны к масштабу признаков.

После предобработки датасета только целевая переменная является количественной. Остальные числовые переменные не были включены в EDA или переведены в категориальный тип.

Основные методы масштабирования числовых данных

Метод	Преимущества	Недостатки
MinMaxScaler (по размаху значений)	Масштабирование значений в определенном диапазоне, чаще от 0 до 1 Сохранение средних значений и стандартного отклонения Сохранение формы распределения	Высокая чувствительность к выбросам данных (особенно когда минимальное и максимальное значения являются выбросами)
Стандартизация или нормализация по Z-оценке (StandardScaler)	Центрирование признака, при котором среднее значение становится равным 0, а стандартное отклонение – 1 Оптимально только для нормального распределения	Изменение формы распределения Изменение диапазона возможных значений Наличие выбросов искажает исходное стандартное отклонение
Робастная нормализация (по межквартильному интервалу)	Устойчивость к выбросам Не зависит от вида распределения, наличия/отсутствия асимметрии	Добавление «значимости» признака в сравнении с остальными при наличии «тяжелого хвоста» после нормализации

Вопрос необходимости и выбора метода масштабирования целевой переменной до сих пор остается открытым в машинном обучении. В рамках данного набора данных масштабирование переменной выхода «Общая стоимость ущерба» может привести к изменению ее статистических метрик и среднеквадратичной ошибки (MSE) из-за наличия «важных» выбросов, асимметрии распределения и «тяжелого хвоста». Удаление аномальных значений недопустимо, они требуют фиксации и дополнительного изучения. Масштабирование переменной «Общая стоимость ущерба» определенно изменит форму ее распределения. Может возникнуть ситуация, когда «масштабированная» переменная образует с признаками связи, которых изначально не существовало в исходных данных. Впоследствии результаты прогноза могут стать противоречивыми и нелогичными. Дополнительные сложности могут возникнуть при возвращении данных к исходному масштабу.

Выводы

В части I (текущая статья) представлены результаты предварительной обработки данных по заручежным авариям на железной дороге. В рамках EDA

обширные реальные данные были обработаны и представлены в структурированной форме, а именно: описаны признаки природного характера и переменная выхода «Общая стоимость ущерба», выполнено их кодирование, установлены различия признаков в разрезе отдельной категории; затронуты вопросы масштабирования признаков и работы с аномальными значениями и др. Обработка данных показала, что природные аварии на железной дороге случаются гораздо реже, чем аварии по техническим, организационным и другими причинами. Однако потенциальный ущерб природно-климатических событий может быть колоссальным, об этом говорит регистрация природных аварий типа «Черный и серый лебеди», выбивающихся из общей статистики. Подобным экстремальным событиям нужно уделять особое внимание и, несмотря на их редкость, быть к ним готовыми.

Таким образом, в данной работе был подготовлен набор данных для дальнейшего статистического исследования. Часть II посвящена количественной оценке различий между признаками и их отбору, построению первых пробных моделей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gonzva M., Barroca B., Gautier P.E. A modeling of disruptions cascade effect within a rail transport system facing a flood hazard // Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars. 2015. № 6(3). Pp. 53–60.
2. Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure / I.S. Oslakovic [et al.] // Proceedings – EPOC 2013 Conference. 2013. Pp. 1–16.
3. Comprehensive Flood Risk Assessment for Railroad Network: Case Study for Iowa / A.B. Cikmaz [et al.] // Research Square. 2024. № 2. Pp. 1–16. doi:https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4171938/v1
4. Analysis of impact of meteorological conditions on human factors in estimating the risk of railway accidents / D. Aleksic [et al.] // Transport. 2017. № 33(5). Pp. 1–14. doi:https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1332684
5. Chikir M. Predicting and minimizing the risk of rail transportation of dangerous goods in the conditions of climate change // Reliability: Theory and Applications. 2024. № 6(81). Pp. 177–186. doi:https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-177-186
6. Khakzad N. Impact of wildfires on Canada's oil sands facilities // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. № 18 (11). Pp. 3153–3166. doi:https://doi.org/10.5194/nhess-18-3153-2018 (date of application: 24.05.2025).
7. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods / G. Antonioni [et al.] // Reliability Engineering and System Safety. 2015. № 142. Pp. 334–345. doi:https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.020
8. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas / V. Cozzani [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. № 28. Pp. 10–22. doi:https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.009

9. Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Levin A.I. Safety of Railway Transport Facilities Operating in Extreme Climatic Conditions // *Advances in Engineering Research*. 2019. № 188. Pp. 328–332. doi:10.2991/aviaent-19.2019.61
10. Changnon S.A. Impacts of the 2008 Floods on Railroads in Illinois and Adjacent States // *Transactions of the Illinois State Academy of Science*. 2009. № 102. Pp. 181–190.
11. Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community. URL : <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 01.04.2025).
12. Талёб Н.Н. Черный лебедь. Под знаком неопределенности. 2-е изд., доп. Москва : КоЛибри ; Азбука-Аттикус, 2022. 736 с.
13. Бушинская А.В., Тимашев С.А. Особенности применения теории хрупкости и антихрупкости при эксплуатации технических систем и конструкций: препринт. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. 80 с.

REFERENCES

1. Gonzva M., Barroca B., Gautier P.E. A modeling of disruptions cascade effect within a rail transport system facing a flood hazard // *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars*. 2015. № 6(3). Pp. 53–60.
2. Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure / I.S. Oslakovic [et al.] // *Proceedings – EPOC 2013 Conference*. 2013. Pp. 1–16.
3. Comprehensive Flood Risk Assessment for Railroad Network: Case Study for Iowa / A.B. Cikmaz [et al.] // *Research Square*. 2024. № 2. Pp. 1–16. doi:<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4171938/v1>
4. Analysis of impact of meteorological conditions on human factors in estimating the risk of railway accidents / D. Aleksic [et al.] // *Transport*. 2017. № 33(5). Pp. 1–14. doi:<https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1332684>
5. Chikir M. Predicting and minimizing the risk of rail transportation of dangerous goods in the conditions of climate change // *Reliability: Theory and Applications*. 2024. № 6(81). Pp. 177–186. doi:<https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-177-186>
6. Khakzad N. Impact of wildfires on Canada's oil sands facilities // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. № 18 (11). Pp. 3153–3166. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-18-3153-2018> (date of application: 24.05.2025).
7. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods / G. Antonioni [et al.] // *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. № 142. Pp. 334–345. doi:<https://doi.org/10.1016/j.res.2015.05.020>
8. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas / V. Cozzani [et al.] // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. № 28. Pp. 10–22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.009>
9. Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Levin A.I. Safety of Railway Transport Facilities Operating in Extreme Climatic Conditions // *Advances in Engineering Research*. 2019. № 188. Pp. 328–332. doi:10.2991/aviaent-19.2019.61
10. Changnon S.A. Impacts of the 2008 Floods on Railroads in Illinois and Adjacent States // *Transactions of the Illinois State Academy of Science*. 2009. № 102. Pp. 181–190.
11. Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community. URL : <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 01.04.2025).
12. Taleb N.N. Chernyj lebed'. Pod znakom neopredelennosti [Black swan. Under the sign of uncertainty] 2-e izd., dop. Moskva : KoLibri ; Azbuka-Attikus, 2022. 736 s.
13. Bushinskaya A.V., Timashev S.A. Osobennosti primeneniya teorii hrupkosti i antihrupkosti pri ekspluatatsii tekhnicheskikh sistem i konstrukcij [Peculiarities of applying the theory of fragility and anti-fragility when operating technical systems and structures] : preprint. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2022. 80 s.

Информация об авторе

М.В. Чикир – младший научный сотрудник и аспирант, магистр строительства.

Information about the author

M.V. Chikir – Junior Research Fellow and Post-graduate Student, Master of Construction.

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 12.09.2025; принята к публикации 12.09.2025.
The article was submitted: 30.06.2025; approved after reviewing: 12.09.2025; accepted for publication: 12.09.2025.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ТРАНСПОРТ АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА»

1. Рассмотрение работ аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук, магистрантов, студентов осуществляется только при **наличии рекомендации научного руководителя**.

2. Статья представляется в редакцию на русском языке в электронном виде как файл «Microsoft Word» (по эл. почте: apj-journal-ed@list.ru). **Статья оформляется согласно ГОСТу Р 7.07–2021.**

3. Обязательная структура статьи:

- код УДК;
- фамилия, имя, отчество автора (ов);
- название статьи на *русском* и *английском* языках;
- аннотация об актуальности и новизне темы статьи, главных содержательных аспектах (120–150 слов) на *русском* и *английском* языках;

• ключевые слова по содержанию статьи (8–10 слов или словосочетаний) на *русском* и *английском* языках. Каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой;

- текст статьи;
- список источников.

4. К рукописи статьи прилагаются сведения об авторе (ах) на русском и английском языках, включающие:

- фамилию, имя, отчество полностью;
- полное название организации в именительном падеже, город;
- адрес организации с указанием почтового индекса;
- ученую степень и ученое звание (если имеются);
- адрес электронной почты;
- телефоны для контактов;
- корреспондентский почтовый адрес.

Сведения об авторе (ах) представляются в редакцию в электронном виде как отдельный файл «Microsoft Word» (по электронной почте).

5. Поля страницы: верхнее – 2 см; нижнее – 2 см; левое – 3 см; правое – 1 см; размер бумаги – А4 (210×297 мм); шрифт – «Times New Roman» № 14; подрисовочная надпись – 12 кегль; межстрочный интервал – 1,5.

6. Обязательным является наличие **экспертного заключения** о возможности опубликования.

7. Название статьи должно четко отражать ее содержание, быть информативным, не должно включать непереводимый сленг, известный только русскоговорящим специалистам.

В переводе названия статьи на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен и других объектов.

8. Авторская аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации.

Аннотация является точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы, без дополнительной интерпретации или критических замечаний автора статьи. Аннотация не должна содержать информацию, которой нет в статье. Включение в аннотацию схем, таблиц, графиков и рисунков не допускается.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. В тексте аннотации следует применять стандартизованную терминологию. Сокращения и аббревиатуры в тексте аннотации не допускаются.

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов), оригинальной и содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований).

Желательно, чтобы аннотация включала в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; основные результаты работы; область применения результатов; выводы.

9. Ключевые слова или словосочетания – это текстовые метки, представляющие содержание статьи, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста. Поэтому при подборе ключевых слов или словосочетаний следует перечислить основные термины, используемые в статье.

10. Поступившие рукописи в обязательном порядке проходят **слепое рецензирование**. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании следующего: положительной рецензии; соответствия представленных материалов тематической направленности журнала; научной значимости, актуальности.

Рукопись, получившая отрицательные отзывы, отклоняется и не возвращается.

Нуждающаяся в доработке статья направляется автору вместе с замечаниями рецензента. Автор должен учесть все замечания и внести изменения, указав место, в электронный вариант текста, после чего статья возвращается в редакцию, где **повторно рецензируется**. В случае несогласия с рецензентом автор должен кратко и четко обосновать свою позицию.

Редакция оставляет за собой право отклонять без рассмотрения по существу статьи, не соответствующие профилю журнала или оформленные с нарушением требований.

11. Редакция информирует авторов о причинах, которые не позволили принять решение о публикации представленных рукописей.

12. Авторы опубликованных статей несут ответственность за точность приведенных фактов, статистических данных, собственных имен и прочих сведений, а также за содержание материалов, не подлежащих открытой публикации.

13. Представляя в редакцию рукопись своей статьи, автор (ы) берет на себя обязательство не публиковать ее ни полностью, ни частично в ином издании без согласия редакции.

14. Опубликованные статьи, а также информация об авторах на русском и английском языках размещается в свободном доступе в Интернете на платформе Научной Электронной Библиотеки – eLIBRARY.RU.

15. Все статьи проходят проверку в системе «Антиплагиат» на предмет некорректных заимствований.

Материалы следует направлять по юридическому адресу журнала: 680021, г. Хабаровск, ул. Серьшева, 47, Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), ауд.359. Редакция журнала «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона». Электронная почта: apj-journal-ed@list.ru

AUTHORS GUIDELINES

GUIDELINES FOR SUBMITTING YOUR MANUSCRIPT TO «PACIFIC RIM COUNTRIES TRANSPORTATION SYSTEM» JOURNAL

1. Research papers from postgraduate and Ph.D. students as well as undergraduates are considered only if they have a reference letter from their research advisor.
2. Articles should be submitted to the editors in Russian or English as «MS Word» file (by e-mail: apr-journal-ed@list.ru). **The article is formatted according to GOST (Russian National Standard) 7.07-2021.**
3. The paper should meet the following requirements and include:
 - surname, first name, patronymic name of the author(s);
 - title of the article both in **Russian** and **English**;
 - abstract including 120–150 words both in Russian and English;
 - key words (8–10 words or word combinations) both in **Russian** and **English**. Each key word or phrase is separated from the other by a comma;
 - text of the article;
 - list of references.
4. A manuscript should be accompanied by the information about the author(s) both in Russian and English, including:
 - surname, first name, patronymic name;
 - full name of the organization, city;
 - address of the organization, indicating the postal code;
 - author(s)' academic degree and academic rank (if any);
 - e-mail address;
 - contact telephone number;
 - postal address.
 Information about the author(s) should be submitted to the editorial board as «MS Word» file (by e-mail).
5. Margins of the page: top – 2 cm; bottom – 2 cm; left – 3 cm; right – 1 cm; font – «Times New Roman» 14; picture caption – 12 size; line spacing – 1,5.
6. It is obligatory to have an **expert opinion** on the possibility of publication.
7. The title of the article should clearly reflect its content, be informative and should not include unintelligible slang known only to Russian-speaking experts. While translating the article into English, please avoid any transliterations from Russian, except for proper names and other objects.
8. The author's abstract is intended to serve as a source of information independent of the article. The abstract is a precise statement of the content of the article, including the main factual information and conclusions, without additional interpretation or critical remarks of the author. The abstract should not contain information that is not included in the article. Schemes, tables, graphs and figures are not allowed in the abstract. The information contained in the title of the article should not be repeated in the text of the abstract. Standardized terminology should be used; abbreviations are not allowed. The abstract should be informative and reflect the main content of the article and research results. It is advisable to include the following aspects in the abstract:
 - subject and purpose of the work;
 - method or methodology of the work;
 - main results of the work;
 - field of application of the results;
 - conclusion.
9. Keywords or phrases are text labels that represent the content of an article and can be used to find the article in a database. Therefore, when selecting keywords or phrases, you should list the main terms used in the article. The manuscripts received are peer reviewed. The decision to publish is made by the editorial board of the journal on the basis of positive review; relevance of the topic.
10. A manuscript with a negative review is rejected and not returned. The article that needs improvement is sent to the author together with the reviewer's comments. The author should take into account all the remarks and make changes, after which the article is returned to the editorial board, where it is repeatedly reviewed. In case of disagreement with the reviewer the author should briefly and clearly justify his position. The editorial board reserves the right to reject articles that do not correspond to the journal's profile.
11. The Editorial Board informs the authors about the reasons that did not allow making a decision on the publication of the submitted manuscripts.
12. The authors of the articles are responsible for the accuracy of the facts, statistics, names and other information.
13. By submitting a manuscript to the editorial board, the author(s) undertakes not to publish it, either in whole or in part, in any other media without the consent of the editorial board.
14. Published articles and information about the authors in Russian and English are placed in free access on the Internet on eLIBRARY.RU platform.
15. All articles are checked by the Anti-Plagiarism system for incorrect borrowings. Materials should be sent to: 680021, Khabarovsk, Seryshev st., 47, Far Eastern State Transport University (FESTU), Editorial Board of «Pacific Rim countries transportation system» journal. E-mail: apr-journal-ed@list.ru