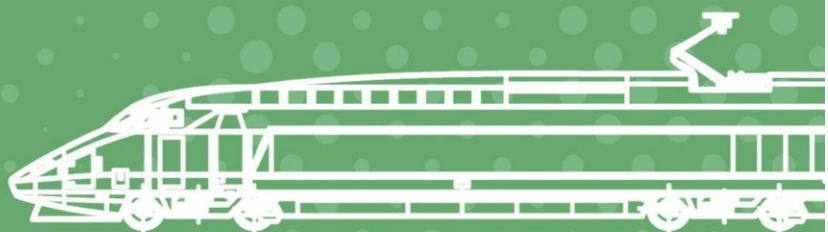


ISSN 2415-8658

**ТРАНСПОРТ
АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО
РЕГИОНА**

**PACIFIC RIM COUNTRIES
TRANSPORTATION SYSTEM**



№ 1 (42) 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

№ 1(42) 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 (РОМГГФ 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
Стойнов 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 Бинчи, 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 17.04.2025. Дата выхода в свет 21.04.2025.
Заказ 78. Усл. печ. л. 14,6. Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–40 экз.). Цена свободная.

Pacific Rim countries transportation system

Scientific Journal
Issued since March 2013
Frequency: 4 issues a year
ISSN 2415-8658
Subscription index
LLC «Ural-Press Okrug» – 25213

№ 1(42) 2025

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, FEFU, 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 (Tech-
nical 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 17.04.2025. Publication date 21.04.2025.
Order 78. P. 14,6. Circulation 500 copies
(1st plant 1–40 copies). Free price.

СОДЕРЖАНИЕ

.....	
Аль-Руфан Фаиз Метаб Муса, Якимович Б.А., Муровский С.П., Кувшинов В.В., Касницкий А.Д. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ	5
Бурков А.Ф., Ковальский К.В., Нгуен Ван Ха ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ	12
Власова Н.В., Брытков В.С. ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО БИЗНЕС-БЛОКА В УСЛОВИЯХ РОСТА ГРУЗОПОТОКА	19
Волчек Т.В., Томилов В.С., Курманова Л.С., Волчек Р.В. КОНТРОЛЬ БДИТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ ЗА СЧЕТ КОНТРОЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА	28
Горшков Н.И., Юань Цзинвэнь, Жданова С.М. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ДОРОЖНЫХ ОТКОСОВ, ВЫЕМОК И НАСЫПЕЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ	33
Григорьев Н.П., Копай И.Г., Малышева О.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 25 КВ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА	41
Демина Л.С., Власенко С.А., Ли В.Н., Игнатенко И.В. НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ И МОНИТОРИНГЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ	49
Демина Л.С., Власенко С.А., Ли В.Н., Березуцкий Ю.Н. ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ	57
Ковтун Б.А., Муравьева Л.Г., Колесникова М.Г. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА	65
Коломиец В.С., Шемякин В.Ю., Кудрявцев С.А. ИЗЫСКАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ И СООРУЖЕНИЙ ИННОВАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	74
Коньков А.Ю., Конькова И.Д., Трунов А.И. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕПЛОТНОСТИ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЯ ПО СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРИЦИЛИНДРОВОГО ДАВЛЕНИЯ	79
Кузьмин О.С., Луценко А.Н., Куликова Е.С. СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ОТ ИСПАРЕНИЙ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ВЫГРУЗКЕ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	87
Ольховиков С.Э., Петренева Е.А. ОРГАНИЗАЦИЯ ОПОРНОГО МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО- ЛОГИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ	95
Тарасов Е.М., Надежкин В.А., Надежкина С.А. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ	103
Чонка А.В., Парахненко И.Л. К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ КАДИОИД В ГЕОМЕТРИИ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ	109
Эсаулов В.А., Мединцев Е.В. О РАЗВИТИИ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ	120
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	125

CONTENTS

.....	
Al-Rufae Faez M., Yakimovich B.A., Murovsky S.P., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D. A COMPARATIVE ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER CIRCUITS	5
Burkov A.F., Kovalsky K.V., Nguyen Van Kha FEATURES OF FUNCTIONING OF ASYNCHRONOUS MOTORS IN AUTONOMOUS SYSTEMS	12
Vlasova N.V., Brytkov V.S ISSUES OF DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS BUSINESS BLOCK IN CONDITIONS OF GROWTH OF FREIGHT FLOW	19
Volchek T.V., Tomilov V.S., Kurmanova L.S., Volchek R.V. MONITORING THE VIGILANCE OF DRIVERS DURING THE OPERATION OF LOCOMOTIVES BY MONITORING HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS	28
Gogshkov N.I., Yuan Jingwen, Zhdanova S.M. ESTIMATION OF STABILITY OF SOIL ROAD SLOPES OF EXCAVATIONS AND EMBANKMENTS BY NUMERICAL METHODS.....	33
Grigoriev N.P., Kopay I.G., Malysheva O.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM 25 KV AND ELECTRIC ROLLING STOCK	41
Demina L.S., Vlasenko S.A., Li V.N., Ignatenko I.V. NEW APPROACHES IN THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTS OF THE CONTACT NETWORK WITH A LONG SERVICE LIFE	49
Demina L.S., Vlasenko S.A., Li V.N., Berezutsky Y.N. DEFECT FORMATION OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTS OF THE CONTACT NETWORK WITH A LONG SERVICE LIFE.....	57
Kovtun B.A., Muravyova L.G., Kolesnikova M.G. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF RAILWAY INFRASTRUCTURE THE SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE REGION	65
Kolomiets V.S., Shemyakin V.Y., Kudryavtsev S.A. SURVEYS, DESIGN AND MONITORING OF RAILWAY TRACKS AND STRUCTURES USING INNOVATIVE TECHNOLOGIES	74
Konkov A.Yu., Konkova I.D., Trunov A.I. FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF DIESEL CYLINDER-PISTON GROUP LEAKAGE BY THE RATE OF CHANGE OF IN-CYLINDER PRESSURE.....	79
Kuzmin O.S., Lutsenko A.N., Kulikova E.S. REDUCTION OF POLLUTANT EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FROM VAPORIZATION OF PETROLEUM PRODUCTS DURING THEIR UNLOADING FROM RAILWAY TRANSPORT	87
Olkhovikov S.E., Petreneva E.A. ORGANIZATION OF A SUPPORTING MULTIMODAL TRANSPORT AND LOGISTICS CENTER IN THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT	95
Tarasov E.M., Nadezhkin V.A., Nadezhkina S.A. ANALYSIS OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF TECHNICAL DIAGNOSTICS AND MONITORING SYSTEMS FOR RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS DEVICES	103
Chonka A.V., Parakhnenko I.L. ON TH USE OF CADIOIDS IN THE GEOMETRY OF A RAILWAY TRACK	109
Esaulov V.A., Medintcev E.V. ON THE DEVELOPMENT OF HEAVY TRAFFIC AT THE EASTERN TRAINING GROUND	120
AUTHORS GUIDELINES.....	126

Научная статья
УДК 620.29
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-5-11

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ

Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса¹, Якимович Борис Анатольевич², Муровский Сергей Петрович³,
Кувшинов Владимир Владиславович⁴, Касницкий Антон Дмитриевич⁵

^{1, 2, 4, 5} Севастопольский государственный университет, Севастополь
³ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
¹ fa99ez@mail.ru
² BAYakimovich@sevsu.ru
³ murovski@inbox.ru
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com
⁵ makkas_snab@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются различные схемы преобразования энергии, основанные на использовании пьезоэлектрических элементов, включая стандартный полный мостовой выпрямитель S-FBR, схему синхронного извлечения заряда с самопитанием SECE и оптимизированную схему синхронного извлечения заряда с самопитанием SECEopt-с. Проведена оценка эффективности каждой из схем, их способности адаптироваться к переменным нагрузкам; даны общие характеристики преобразования энергии. Анализ показал, что схема SECEopt-с демонстрирует наивысшую эффективность благодаря усовершенствованной технологии переключения и стабильной выходной мощности. Экспериментально установлено, что оптимизированная схема SECEopt-с является наиболее подходящим решением для маломощных систем. Также определено, что схемы SECE и SECEopt-с значительно увеличивают количество преобразуемой энергии по сравнению со стандартной схемой S-FBR. Особую эффективность данные методы демонстрируют при преобразовании энергии от нерегулярных и динамических сигналов, таких как вибрации или волновые колебания. Таким образом, применение схем SECE и SECEopt-с может существенно повысить эффективность систем энергообеспечения для маломощных устройств.

Ключевые слова: пьезоэлектрические элементы, синхронное извлечение заряда, схемы преобразования энергии, автономные системы, эффективность преобразования энергии, механические вибрации

Original article

A COMPARATIVE ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER CIRCUITS

Al-Rufae Faez M.¹, Yakimovich Boris A.², Murovsky Sergey P.³,
Kuvshinov Vladimir V.⁴, Kasnitsky Anton D.⁵

^{1, 2, 4, 5} Sevastopol State University, Sevastopol
³ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹ fa99ez@mail.ru
² BAYakimovich@sevsu.ru
³ murovski@inbox.ru
⁴ kuvshinov.vladimir@gmail.com
⁵ makkas_snab@mail.ru

Abstract. In the article, various piezoelectric energy harvesting circuits including the standard full bridge rectifier (S-FBR), self-powered synchronous charge extraction (SECE) and optimized self-powered synchronous charge extraction (SECE-opt) circuits are discussed. The performance of each scheme, their ability to adapt to variable loads and overall power conversion characteristics were evaluated. The analysis showed that the self-powered SECE-opt scheme exhibits the highest efficiency due to its advanced switching technology and stable output power. It was experimentally found that the optimized SECE-opt circuit is the most suitable solution for low-power applications. It was also found that SECE and SECE-opt schemes significantly increase the amount of energy harvested compared to the standard S-FBR scheme. These techniques are particularly effective in harvesting energy from irregular and dynamic signals such as vibrations and wave oscillations. Thus, the use of SECE and SECE-opt schemes can significantly improve the efficiency of power supply systems for sensors and other low-power devices.

Keywords: piezoelectric elements, synchronous charge extraction, energy conversion circuits, autonomous systems, energy conversion efficiency, mechanical vibrations

Введение

Преобразование энергии из окружающей среды с использованием пьезоэлектрических элементов представляет собой одно из перспективных направлений в области энергоснабжения маломощных устройств. Это направление особенно актуально в условиях растущего спроса на автономные системы, такие как беспроводные сенсоры, медицинские импланты и другие устройства ИТ-технологий. Пьезоэлектрические элементы обладают способностью преобразовывать механическую энергию, например вибрации или волны, в электрическую, что делает их эффективным источником энергии для устройств с низким энергопотреблением [1, 2]. Современные маломощные устройства, такие как морские буи, используемые в навигации судов, требуют энергоэффективных источников питания для обеспечения автономной работы. Одним из перспективных решений является использование механической энергии движений волны с целью её преобразования в электричество с помощью пьезоэлектрических элементов [3–5]. Пьезоэлектрические элементы преобразуют механическую энергию, возникающую при движении, в электрическую энергию [6, 7]. Однако эффективность таких систем зависит от применяемых схем преобразования энергии, которые должны минимизировать потери и обеспечивать стабильную выходную мощность [8–10]. Интеграция электрических цепей с пьезоэлектрическими материалами необходима для повышения эффективности преобразователей энергии и удобства использования в различных устройствах. Пьезоэлектрические материалы преобразуют механическую энергию, такую как давление или вибрация, в электрическую энергию за счет пьезоэлектрического эффекта. Однако на выходе обычно получается переменный ток АС или импульсы, которые для эффективного использования требуют обработки. Оборудование электрических цепей, в частности выпрямители и накопители энергии, преобразуют переменный ток в постоянный DC, питающий устройства напрямую или хранящийся в различных накопителях для последующего использования [10]. В данной работе проведён экспериментальный анализ трех типов схем для оценки их производительности и стабильности в условиях реальных сигналов.

Цель работы – проведение сравнительного анализа различных цепей преобразования энергии на основе пьезоэлектрических элементов, оценка их эффективности, адаптивности к различным нагрузкам и применимости в реальных условиях. Особое внимание уделено оптимизированной цепи SECEопт-с, которая показывает высокий уровень производительности благодаря улучшенным технологиям переключения и стабильной выходной мощности.

Основные задачи исследования включают проведение оценки выходной мощности схем, сравнение стабильности работы и производительности схем в условиях изменяющихся нагрузок, а также выбор оптимального решения для питания маломощных устройств.

Методы исследования: проведение моделирования и экспериментальных тестов пьезоэлектрических генераторов, подключенных к электрическим цепям; проведение экспериментальных исследований для каждой схемы, измерение выходной мощности и времени стабильности работы; сбор данных с использованием специализированных систем измерения и обработка результатов для выбора оптимальных параметров работы каждой схемы.

Характеристики цепей анализируются с целью оценки влияния значений компонентов на выходную мощность. Результат состоит в том, чтобы определить оптимальные значения этих компонентов для максимизации выработки электроэнергии. В экспериментальном исследовании представлены три цепи, где выбор оптимальных параметров имеет решающее значение для повышения выходной мощности. На рис. 1 изображен алгоритм оценки электрических схем, предназначенных для преобразования энергии с использованием пьезоэлектрических элементов. Алгоритм предусматривает пошаговую настройку параметров компонентов каждой схемы с целью определения конфигурации, обеспечивающей максимальную эффективность преобразования. Этот подход обеспечивает структурированную методику сравнительного анализа различных схем преобразования энергии, позволяя определить оптимальные значения компонентов для каждой из них. Полученные результаты предоставляют инструмент для выбора наиболее эффективной схемы, адаптированной к конкретным условиям, включая динамические воздействия, такие как волновые колебания.

В работе экспериментально оценивались характеристики трех схем. На рис. 2 показана экспериментальная установка, состоящая из пьезоэлемента PVDF, прикрепленного к вибростенду для имитации вибрационных воздействий. Система управления в реальном времени dSpace использовалась для захвата и регистрации сигналов дифференциального виброметра и акселерометра.

Система также управляла усилителем мощности, который обеспечивал необходимый привод электромагнитного вибратора. Для поддержания постоянной амплитуды колебаний реализована замкнутая система управления, обеспечивающая стабильность синусоидального возбуждения на протяжении всех экспериментов. К схеме был подключен пьезоэлектрический элемент, а к выходу схемы – программируемый резистор для регулировки значений сопротивления во время тестирования. Все данные измерений записаны с помощью устройства DAQ (NI 9229).

Таблица

Компоненты системы

Элемент	Количество, наименование
ПЭ	5
Диод	B140BQ-13-F
Транзистор NPN	ZVN2110GTA
Транзистор PNP	IRFL9110TRPBF
Индикатор 1, 2	TG05-2004NCRL

Экспериментальные исследования

Исследование пьезоэлектрических схем преобразования энергии часто проводится с использованием симметричных синусоидальных сигналов с частотой, превышающей частоту системы. В среднем генерируемый схемой сигнал находится в диапазоне частоты от 0 до 100 Гц [6]. Чтобы смоделировать это, был разработан источник напряжения, генерирующий аналогичный сигнал (рис. 3). Сигнал создается с помощью двух последовательно соединенных экспоненциальных источников напряжения, генерирующих сигнал, имитирующий волну. Регулируя определенные значения в формуле экспоненты, можно моделировать различные волны, которые похожи на реальный сигнал, снятый ранее.

Эквивалентные электрические модели (ПЭ-PVDF) показаны на рис. 4.



Рис. 1. Алгоритм оценки мощности электрических схем для пьезоэлектрического преобразования энергии

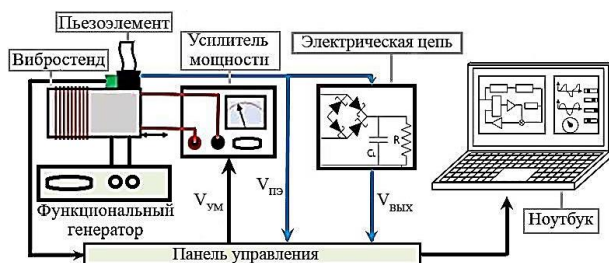


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Транзисторы MOSFET, диоды и индуктор образуют электронный коммутатор (таблица).

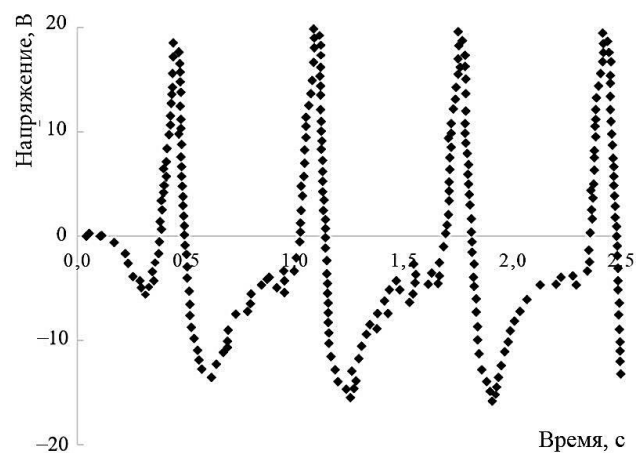


Рис. 3. Источник напряжения, генерирующий аналогичный сигнал морской волны

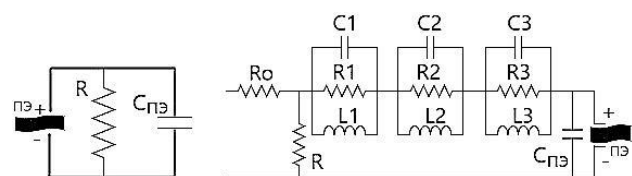


Рис. 4. Схема эквивалентная электрическая ПЭ-PVDF

Цепь полного мостового выпрямителя. Полный мостовой выпрямитель – одна из самых распространенных и широко используемых схем выпрямления. Он состоит из четырех диодов или транзисторов, обычно расположенных в конфигурации моста Вит-

стоуна. На выходе подключены фильтрующий конденсатор C и нагрузочное сопротивление R (рис. 5). Конденсатор фильтра необходим для сглаживания колебаний напряжения и обеспечения стабильного постоянного тока на выходе [7, 8]. В данном исследовании рассматриваются два типа полных мостовых выпрямителей, один – на основе диодов, а другой – на комплементарных МОП-транзисторах CMOS.

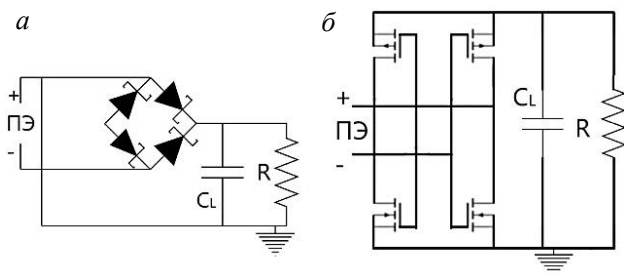


Рис. 5. Электрическая схема FBR: *а* – выпрямитель на основе диодов (S-FBR); *б* – комплементарный металл-оксид-полупроводниковый выпрямитель (CMOS)

Схема пассивного выпрямителя проста и удобна в изготовлении (рис. 5, *а*). Однако падение прямого напряжения на диодах может привести к значительным потерям мощности, особенно при низком входном напряжении. По этой причине в данном моделировании используются диоды Шоттки, ко-

торые имеют меньшее прямое падение напряжения по сравнению с кремниевыми диодами.

В схеме для выпрямления используются МОП-транзисторы вместо диодов (рис. 5, *б*). Одним из преимуществ такого подхода является то, что МОП-транзисторы имеют гораздо меньшее прямое падение напряжения, что позволяет снизить потери и повысить энергоэффективность. Однако выбор МОП-транзисторов очень важен для обеспечения эффективного выпрямления.

Производительность выпрямителя на диодах и схемы CMOS зависит от сопротивления и емкости нагрузки (рис. 6). При меньшем сопротивлении нагрузки схемы выдают большую выходную мощность, но стабильное выходное напряжение достигается только при более высоких значениях сопротивления и емкости нагрузки. В связи с такой зависимостью были предложены другие нелинейные схемы преобразования энергии на пьезоэлементах.

На рис. 7 и 8 сравниваются выходные напряжения схем S-FBR и CMOS при различных значениях емкости фильтра. Видно, что CMOS требует большего нагрузочного конденсатора для стабилизации выходного напряжения по сравнению с S-FBR. Разница обусловлена емкостью спада, присущей МОП-транзисторам, которая влияет на общее время зарядки и эффективность.

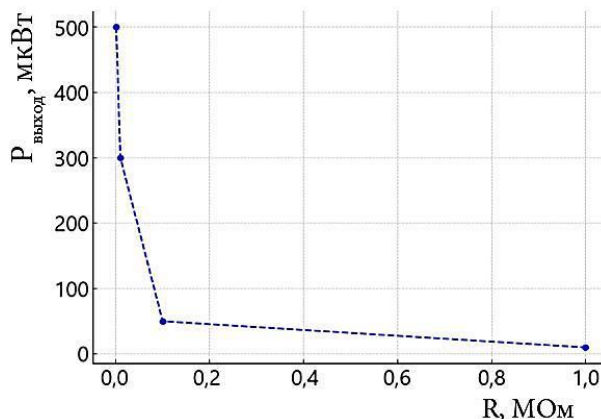
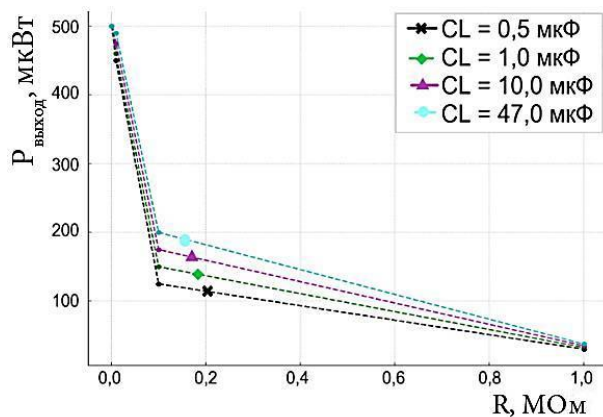


Рис. 6. Влияние нагрузки на цепь полного мостового выпрямителя

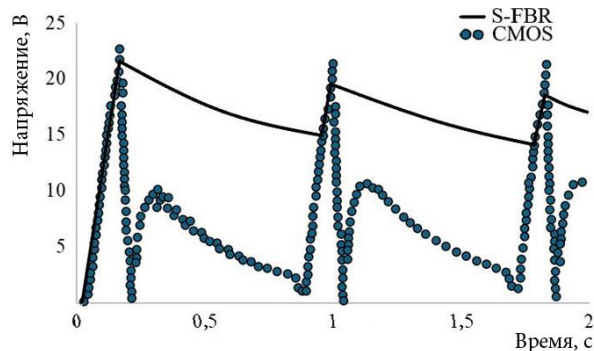


Рис. 7. Выходное напряжение при $C_L = 5$ мкФ и $R = 0,25$ МОм

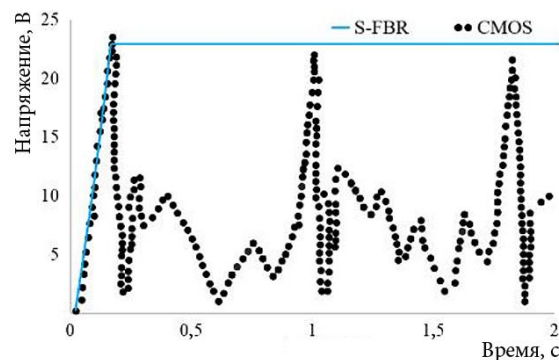


Рис. 8. Выходное напряжение при $C_L = 1$ мкФ и $R = 0,25$ МОм

Результаты моделирования показывают, что для получения стабильного выходного напряжения необходимо очень высокое значение C_L .

Цепь SECE. Схема SECEс – еще одна нелинейная технология, предложенная для преобразования пьезоэлектрической энергии. Она отличается от самопитания р-SSH тем, что для передачи энергии от пьезоэлектрического элемента к нагрузке используется трансформатор [9, 10]. Основное преимущество схемы SECEс заключается в том, что она в значительной степени не зависит от нагрузки, что делает ее более универсальным вариантом для различных приложений (рис. 9). В этой схеме пьезоэлектрический элемент заряжается до пикового значения, а затем включается переключатель, передавая энергию на конденсатор нагрузки через L-CL-C резонанс. Подобно р-SSH, эта схема использует детектор огибающей и компаратор для включения переключателя, но для нее требуется меньше компонентов, чем для р-SSH.

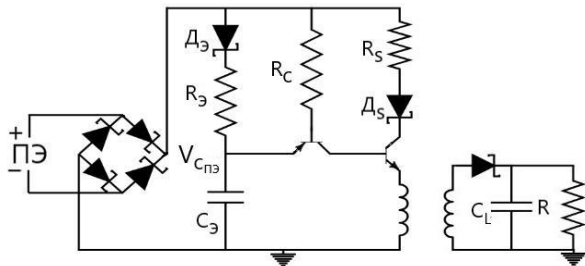


Рис. 9. Принципиальная схема электрической цепи SECEс

В результате моделирования средняя выходная мощность уменьшается при увеличении емкости обкладок (рис. 10). Это связано с задержкой переключения, вызванной большими емкостями конденсаторов. Оптимальные характеристики SECEс достигаются при меньших сопротивлениях и ёмкостях огибающей.

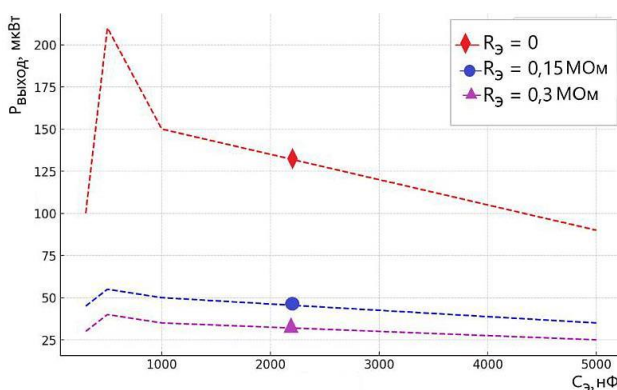


Рис. 10. Выходная мощность в зависимости от различных значений R_3 при $R = 1,1 \text{ МОм}$ и $C_L = 10 \text{ мкФ}$

На рис. 11 показано, как изменяется средняя выходная мощность при различных компонентах нагрузки. Схема работает лучше всего, когда ём-

кость нагрузки мала и остается стабильной в широком диапазоне сопротивлений нагрузки.

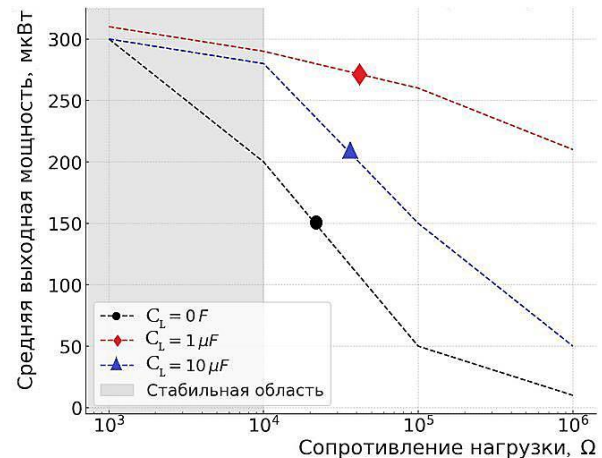


Рис. 11. Выходная мощность в зависимости от различных значений R , C_L при $R_3 = 0 \text{ Ом}$ и $C_3 = 300 \text{ нФ}$

Цепь SECEопт-с. Схема SECEопт-с развивает схему SECEс за счет дальнейшей оптимизации процесса выпрямления и извлечения заряда. В этой схеме используется мультиплексирование для уменьшения количества компонентов, что повышает эффективность и снижает потери мощности (рис. 12).

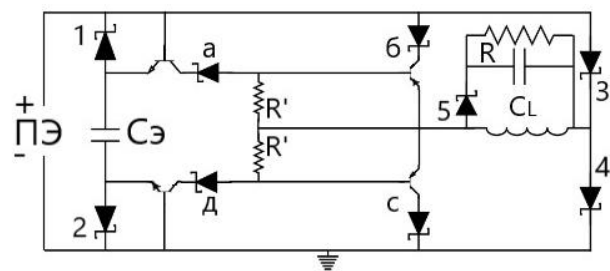


Рис. 12. Принципиальная схема электрической цепи SECEопт-с

Благодаря отсутствию трансформатора схема SECEопт-с снижает индуктивные потери при передаче энергии, демонстрируя самую высокую среднюю выходную мощность среди всех исследованных схем. На рис. 13 показано, как различные огибающие сопротивления и емкости влияют на выходную мощность, а на рис. 14 приведены выходные характеристики для различных компонентов нагрузки. Схема поддерживает стабильную выходную мощность в широком диапазоне сопротивлений и ёмкостей нагрузки, что делает ее идеальной для практического применения. SECEопт-с показала наилучшую общую производительность благодаря использованию мультиплексирования, которое оптимизировало получение выходного сигнала напряжения и его выпрямления, что привело к более высокой выходной мощности и стабильности по сравнению с другими схемами.

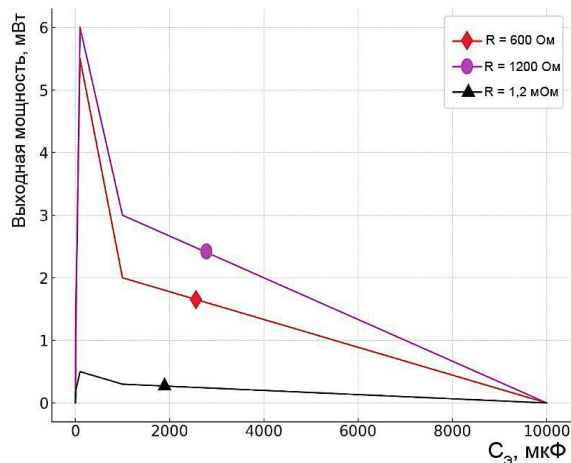


Рис. 13. Выходная мощность в зависимости от различных значений R' , C_L при $R = 8 \text{ мОм}$ и $C_L = 25 \text{ мкФ}$

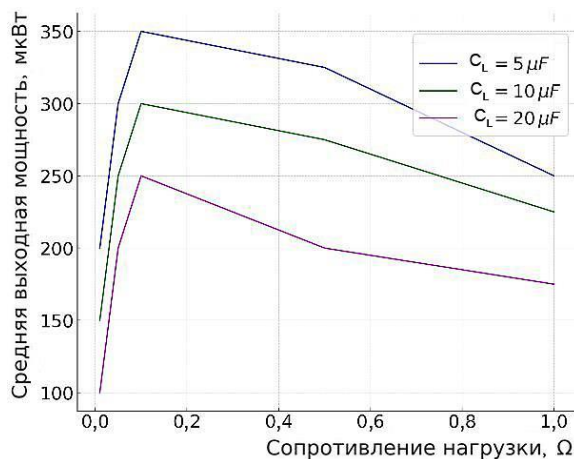


Рис. 14. Выходная мощность в зависимости от различных значений R , C_L

Обсуждение результатов

Результаты моделирования показали, что нелинейные техники преобразования энергии, такие как SECEс и SECEопт-с, значительно улучшают эффективность по сравнению с традиционными схемами преобразования энергии, такими как S-FBR. Основные выводы включают:

- эффективность: схемы SECEс и SECEопт-с продемонстрировали увеличение выработки мощности по сравнению со стандартной схемой S-FBR. Эти методы особенно эффективны при преобразовании энергии от неравномерных и динамических сигналов, например, возникающих при колебании волн;
- генерация энергии: схема SECEопт-с обеспечила наибольшую среднюю мощность, что делает её наиболее эффективной для питания маломощных устройств.

Выводы

В ходе исследования были смоделированы и проанализированы три схемы преобразования энергии колебательного движения, основанные на пьезоэлектрических элементах. В результате моделирования сделан вывод, что все рассмотренные схемы могут использоваться для преобразования энергии на пьезоэлектрических элементах, но схема SECEопт-с обеспечивает наиболее эффективное преобразование энергии колебательного движения и стабильный выходной сигнал в условиях изменяющихся нагрузок. Схема SECEопт-с для автономного питания маломощных устройств оказывается наиболее перспективной для низкочастотных колебаний, таких как морские волны, благодаря повышенной эффективности преобразования энергии и меньшему количеству компонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аль-Руфай Ф.М.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. Основные положения методики оценки эффективности пьезопреобразователей // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 28–34.
2. Разработка и анализ комбинированной энергетической системы на основе пьезоэлектрических элементов / Ф.М.М. Аль-Руфай, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов, В.В. Смирнов // Промышленная энергетика. 2024. № 3. С. 31–40.
3. Multi-input SECE based on buck structure for piezoelectric energy harvesting. IEEE Transactions on Power / X. Wang [et al.] // Electronics/ 2021. Vol. 36. № 4. Pp. 3638–3642.
4. Использование пьезоэлектрических материалов для выработки электроэнергии от механических нагрузок на дорожное покрытие / Ф.М.М. Аль-Руфай, Б.А. Якимович, С.П. Муровский [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 1(38). С. 5–12.
5. Li H., Tian C., Deng Z.D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials // Applied Physics Reviews. 2014. № 1(4). P. 041301.
6. Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion / A. Rahman, O. Farrok, M.R. Islam, W. Xu // IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions. 2020. Vol. 8. Pp. 138595–138615.
7. Maximum performance of piezoelectric energy harvesters when coupled to interface circuits / L.M. Miller, A.D.T. Elliott, P.D. Mitcheson [et al.] // IEEE Sensors journal. Vol. 16. № 12. Pp. 4803–4815.
8. Mingjie Guan, Liao Wei-Hsin. Comparative analysis of piezoelectric power harvesting circuits for rechargeable batteries // IEEE Transactions on Power Electronics. 2005. № 4. Pp. 243–246.
9. Shafer B.W., Yoon S. Comparison of energy harvesting circuits for piezoelectric devices // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. № 32(4). Pp. 2793–2800.
10. Edla M., Deguchi M., Lim Y.Y. A self-powered H-Bridge joule theory circuit for piezoelectric energy harvesting systems // Power Electronic Devices and Components. 2022. Vol. 3. Pp. 1–9.

REFERENCES

1. Al-Rufae F.M.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Osnovnye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti p'ezopreobrazovatelej [Main provisions of the method of efficiency evaluation of piezoelectric energy harvesters] // Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova. 2023. T. 26, № 1. S. 28–34.
2. Razrabotka i analiz kombinirovannoj energeticheskoy sistemy na osnove pezelektricheskikh elementov [Development and analysis of a combined energy system on the basis of piezoelectric elements] / F.M.M. Al-Rufae, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov, V. V. Smirnov // Promyshlennaya energetika. 2024. № 3. S. 31–40.
3. Multi-input SECE based on buck structure for piezoelectric energy harvesting. IEEE Transactions on Power / X. Wang [et al.] // Electronics. 2021. Vol. 36. № 4. Pp. 3638–3642.
4. Ispol'zovanie p'ezoelektricheskikh materialov dlya vyrabotki elektroenergii ot mekhanicheskikh nagruzok na dorozhnoye pokrytie [Use of piezoelectric materials for electric power generation from mechanical loads on road surface] / F.M.M. Al-Rufae, B.A. Yakimovich, S.P. Murovskij [i dr.] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2024. № 1(38). S. 5–12.
5. Li H., Tian C., Deng, Z.D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. // Applied Physics Reviews. 2014. № 1(4). P. 041301.
6. Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion / A. Rahman, O. Farrok, M.R. Islam, W. Xu // IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions. 2020. Vol 8. Pp. 138595–138615.
7. Maximum performance of piezoelectric energy harvesters when coupled to interface circuits / L.M. Miller, A.D.T. Elliott, P.D. Mitcheson [et al.] // IEEE Sensors journal. Vol. 16. № 12. Pp. 4803–4815.
8. Mingjie Guan, Liao Wei-Hsin. Comparative analysis of piezoelectric power harvesting circuits for rechargeable batteries // IEEE Transactions on Power Electronics. 2005. № 4. Pp. 243–246.
9. Shafer B.W., Yoon S. Comparison of energy harvesting circuits for piezoelectric devices // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. № 32(4). Pp. 2793–2800.
10. Edla M., Deguchi M., Lim Y.Y. A self-powered H-Bridge joule theory circuit for piezoelectric energy harvesting systems // Power Electronic Devices and Components. 2022. Vol. 3. Pp. 1–9.

Информация об авторах

Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

Б.А. Якимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

С.П. Муровский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;

В.В. Кувшинов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»;

А.Д. Касницкий – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников».

Information about the authors

Al-Rufae Faez Metab Mousa – Postgraduate Student, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources;

B.A. Yakimovich – Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources;

S.P. Murovsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;

V.V. Kuvshinov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources;

A.D. Kasnitsky – Postgraduate Student, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024; одобрена после рецензирования 24.12.2024; принята к публикации 27.02.2025.

The article was submitted: 03.12.2024; approved after reviewing: 24.12.2024; accepted for publication: 27.02.2025.

Научная статья
УДК 621.313
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-12-18

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ

Бурков Алексей Фёдорович¹, Ковальский Константин Владиславович², Нгуен Ван Ха³

^{1, 2, 3} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

¹ burkov.22@mail.ru

² kovalskiy_kostya@mail.ru

³ khanguyenx6@gmail.com

Аннотация. В настоящее время в различных отраслях хозяйственной деятельности, в частности на судах транспортной отрасли, широко используются электроэнергетические системы трехфазного переменного тока частотой 50 Гц (реже – частотой 60 Гц), характерной особенностью которых является их автономность и соизмеримость единичной мощности отдельных приемников и источников электрической энергии. Основные источники электрической энергии – трехфазные синхронные генераторы, а приемники электрической энергии – трехфазные асинхронные двигатели судовых электроприводов, эксплуатационные режимы которых оказывают непосредственное влияние на качество судовой электрической энергии и величину потерь. Рассмотрены основные варианты возможных режимов работы электроприводов трехфазного переменного тока в автономных электроэнергетических системах.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, статические несимметричные режимы работы, трехфазный переменный ток, асинхронный электрический двигатель, электропривод

Original article

FEATURES OF FUNCTIONING OF ASYNCHRONOUS MOTORS IN AUTONOMOUS SYSTEMS

Burkov Aleksey F.², Kovalsky Konstantin V.², Nguyen Van Kha³

^{1, 2, 3} Far Eastern Federal University, Vladivostok

¹ burkov.22@mail.ru

² kovalskiy_kostya@mail.ru

³ khanguyenx6@gmail.com

Abstract. At present, in various branches of economic activity, in particular on ships of the transport industry, three-phase alternating current electric power systems with a frequency of 50 Hz (less often – 60 Hz) are widely used, a characteristic feature of which is their autonomy and commensurability of the unit power of individual receivers and sources of electric energy. The main sources of electric energy are three-phase synchronous generators, and the receivers of electric energy are three-phase asynchronous motors of ship electric drives, the operating modes of which have a direct impact on the quality of ship electric energy and the amount of losses. The article considers the main options for possible operating modes of three-phase alternating current electric drives in autonomous electric power systems.

Keywords: autonomous electric power system, static asymmetric operating modes, three-phase alternating current, asynchronous electric motor, electric drive

В системах электроприводов (ЭП) трехфазных асинхронных электродвигателей (ЭД) основное внимание уделяется так называемым статическим режимам работы. Эти режимы можно трактовать как специальные случаи переходных процессов, когда сохраняется постоянство угловой скорости ротора ($\omega_r = \text{const}$) и отсутствует динамический момент ($M_d = 0$) [1]. В силу указанных условий именно статические режимы служат базой для анализа работы ЭД при квазипостоянном значении угловой скорости.

В электротехнике принято классифицировать установившиеся режимы работы электрических машин на два типа: сбалансированные и несбалансированные. В сбалансированных условиях функционирования асинхронных машин ключевым критерием выступает идентичность электромагнитных характеристик во всех трёх фазах. Это означает, что все параметры системы – токи, напряжения, потоки сцепления – формируются исключительно компонентами синфазной (прямой) последовательности.

Математическое представление фазных токов

С учётом стандартных допущений [2], мгновенные токи статора в синфазном режиме для каждой фазы выражаются через комплексные функции. Для фазы А:

$$i_A = \text{Re}(I_A) = \frac{1}{2}(I_A + I_A^*), \quad (1)$$

где I_A – комплексный ток; I_A^* – его сопряжённое значение. Для фаз В и С вводятся фазовые операторы a и a^2 , соответствующие смещению на 120° и 240° в трёхфазной системе.

Специфика комплексных операторов

Операторы $a = e^{(j2\pi/3)}$, $a^2 = e^{(j4\pi/3)}$ обеспечивают математическое описание фазовых сдвигов. Например, ток фазы В записывается как

$$i_B = \text{Re}(I_A a^2) = \frac{1}{2}(I_A a^2 + I_A^* a). \quad (2)$$

Преобразование в ортогональные системы координат

Для упрощения анализа трёхфазные величины переводятся в двумерную систему координат $\alpha\beta$. Результирующий комплексный ток статора определяется как

$$I_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(i_A + i_B a + i_C a^2). \quad (3)$$

После подстановки выражений для фазных токов и алгебраических преобразований получается

$$I_{\alpha\beta} = I_A = I_m, \quad (4)$$

где $I_m = I_A e^{j\theta}$ – амплитуда тока с частотой $f_r = s f_s$. Аналогичные преобразования применяются для потокосцеплений $\Psi_{\alpha\beta}$ и напряжений $U_{\alpha\beta}$.

Особенности роторных параметров

Частота тока в роторе f_r связана со скольжением s и статорной частотой f_s

$$f_r = s f_s. \quad (5)$$

Роторные величины (ток, потокосцепление, напряжение) в осях dq выражаются через комплексные амплитуды:

$$I_r^{dq} = I_{r,m} e^{j\phi}, \quad \Psi_r^{dq} = \Psi_{r,m} e^{j\psi}, \quad U_r^{dq} = U_{r,m} e^{j\xi}, \quad (6)$$

где ϕ , ψ , ξ – фазовые углы; m – амплитудные значения.

Данный подход позволяет унифицировать анализ асинхронных машин, сводя трёхфазные системы к эквивалентным двумерным моделям. Это упрощает расчёт динамических характеристик и проектирование систем управления, сохраняя физическую интерпретацию процессов.

Проводя анализ электродинамических процессов в трехфазных асинхронных машинах при несимметричных режимах, следует отметить сле-

дующее: при моделировании работы 3-фазных электромеханических систем ключевым этапом является преобразование математических описаний из комплексной формы в уравнения, характеризующие установившиеся режимы. Для упомянутого используются базовые принципы баланса электрических величин статора, а также ротора, представленные непосредственно в системе координат, не участвующей во вращении (нулевая угловая скорость). Основные соотношения имеют вид:

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j 0_s; \quad (7)$$

$$U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j 0_{sr}. \quad (8)$$

После интегрирования в данные выражения предварительно определенных комплексных зависимостей, а также выполнения математических операций формируется система уравнений, описывающая трехфазные асинхронные машины через эквивалентные трансформаторные модели:

$$U_s = I_s R_s + I j \omega_s L_{s\sigma} + j \omega_s L_{sr} I_m; \quad (9)$$

$$U_r = (I_r (R_r/s + j \omega_r L_{r\sigma}) + j \omega_r L_{sr} I_m) s = 0, \quad (10)$$

где ω_s – произвольная угловая скорость осей координат; L_{sr} – взаимная индуктивность, связывающая обмотки статора и ротора.

Особенности режимов работы в автономных сетях

В условиях локальных энергосистем (например, судовых) электродвигатели могут эксплуатироваться в симметричных, существенно несимметричных режимах. Последние возникают из-за дисбаланса нагрузок по фазам, это может быть обусловлено эксплуатационными факторами, аварийными ситуациями. Так, например, при незначительной разнице в потреблении фаз система сохраняет условную симметрию, однако, при критическом рассогласовании возникает выраженная несимметрия.

Метод симметричных составляющих

Для проведения анализа таких режимов применяется декомпозиция несимметричных трехфазных величин на симметричные компоненты. Напряжения статора U_{sA}, U_{sB}, U_{sC} раскладываются непосредственно на составляющие прямой $U_{спрA}, U_{спрB}, U_{спрC}$ и обратной $U_{sobA}, U_{sobB}, U_{sobC}$ последовательностей. Для фазы А это преобразование выглядит следующим образом:

$$U_{спрA} = \frac{U_{sA} + U_{sB} a + U_{sC} a^2}{3}; \quad (11)$$

$$U_{sobA} = \frac{U_{sA} + U_{sB} a^2 + U_{sC} a}{3}, \quad (12)$$

где a – комплексный оператор поворота, определяемый стандартными соотношениями.

Токовые характеристики при несимметрии

С учетом эквивалентных схем замещения [2], токи статора в каждой фазе выражаются посредством суммы составляющих прямой, обратной последовательностей:

$$I_{\text{спр}} = \frac{U_{\text{спр}}}{R_s + jX_{s\sigma} + (Z_m^{-1} + Z_{r\text{пр}}^{-1})^{-1}}; \quad (13)$$

$$I_{\text{об}} = \frac{U_{\text{об}}}{R_s + jX_{s\sigma} + (Z_m^{-1} + Z_{r\text{об}}^{-1})^{-1}}, \quad (14)$$

где Z_m – комплексное сопротивление намагничивающего контура; $Z_{r\text{пр}}, Z_{r\text{об}}$ – эквивалентные сопротивления ротора непосредственно для прямой, а также обратной последовательностей:

$$Z_{r\text{пр}} = \frac{R'_r}{s} + jX'_{r\sigma}; \quad (15)$$

$$Z_{r\text{об}} = \frac{R'_r}{2-s} + jX'_{r\sigma}. \quad (16)$$

Частота обратных токов ротора $f_{r\text{об}} = (2-s)f_s$ значительно превышает частоту прямой последовательности, – это усиливает поверхностный эффект, а также повышает активные потери.

Практические последствия несимметрии

Даже при незначительном искажении напряжения (например, 4 %) в соотношении $U_{\text{об}}/U_{\text{спр}}$ амплитуда обратных токов может достигать 20 % от номинальных значений ($I_{\text{об}}/I_{\text{спр}} = 0,2$). В отдельных фазах это приводит к локальному росту токовой нагрузки до 1,2 о.е., увеличивая потери до 1,44 о.е. Такие условия требуют дополнительных мер защиты, в том числе мониторинг симметрии, а также автоматическую коррекцию режимов [3].

Момент вращения M асинхронного двигателя (с тремя фазами) при несимметричных статорных напряжениях представляется непосредственно в виде суммы двух составных частей:

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{об}}, \quad (17)$$

где $M_{\text{пр}}, M_{\text{об}}$ – моменты, соответствующие компонентам прямой и обратной последовательностей. Более детально они вычисляются по формулам:

$$M_{\text{пр}} = \frac{m_s U_{\text{спр}}^2 R'_r}{s \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left(X_{s\sigma} + X'_{r\sigma} \right)^2 \right)}; \quad (18)$$

$$M_{\text{об}} = \frac{m_s U_{\text{об}}^2 R'_r}{(2-s) \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{2-s} \right)^2 + \left(X_{s\sigma} + X'_{r\sigma} \right)^2 \right)}, \quad (19)$$

где m_s – количество фаз обмотки, являющейся статорной; $R'_r, X'_{r\sigma}$ – значения сопротивлений (активного и индуктивного) приведенного рассеяния обмотки роторного типа.

Для поддержания устойчивого электромагнитного момента M при асимметричных напряжениях статора необходимо нейтрализовать влияние паразитного момента $M_{\text{об}}$ путём корректировки активной составляющей момента $M_{\text{пр}}$. Это вызывает рост скольжения s пропорционально отношению $M_{\text{пр}}/(M_{\text{пр}} - |M_{\text{об}}|)$, что негативно отражается на энергоэффективности асинхронного двигателя (АД): возрастают потери в обмотках, и снижается КПД системы.

Даже при номинальном распределении фазных напряжений дисбаланс в работе АД может провоцироваться следующими факторами:

- **технологическими отклонениями** – неточностью сборки, разбросом параметров материалов;
- **эксплуатационными воздействиями** – вибрациями, перегрузками, температурными перепадами, влажностью;
- **деградацией компонентов** – износом опорных узлов, деформацией контактных групп, старением изоляции обмоток.

Критичными также являются дефекты, формирующиеся в процессе службы двигателя: межвитковые замыкания, нарушение целостности стержней ротора, локальный перегрев магнитопровода [1]. Изучение этих явлений, включая моделирование различных сценариев повреждений, детально рассмотрено в научных трудах [4–6].

Отдельное внимание в исследованиях уделяется комплексным аварийным режимам, таким как:

- совмещённые искажения в статорных и роторных цепях;
- межфазные КЗ в обмотках статора;
- проба изоляции роторных шин [7–9].

Для минимизации рисков в автономных электроэнергетических системах (ЭЭС) внедряются инновационные подходы, например: адаптивные алгоритмы диагностики; гибридные управляющие комплексы, сочетающие цифровые и аналоговые модули [10–12].

Применение комбинированных систем управления (КСУ) [13], однако, создаёт новые проблемы. В частности, нелинейные режимы питания статора, связанные с неидеальными характеристиками силовых ключей (тиристоров, IGBT); дисбалансом в цепях управления ПП; отказами полупроводниковых элементов (пробой р–п-перехода, обрыв контакта).

Статистика отказов, в том числе такой показатель, как частота возникновения КЗ и обрывов в диодах/транзисторах, систематизирована в табл. 1 [14], где наглядно демонстрируется зависимость надёжности ЭП от качества элементной базы.

Таблица 1

**Соотношения между отказами
полупроводниковых приборов
при различных коэффициентах нагрузок k_n**

Тип элемента	Вид отказа	Значение k_n		
		0,0...0,3	0,3...0,7	0,7...1,0
Диоды	Обрыв	0,75	0,75...0,95	0,55
	КЗ	0,25	0,25...0,05	0,45
Триоды	Обрыв	0,00...0,20	0,20...0,05	0,00...0,05
	КЗ	1,00...0,80	0,80...0,95	1,00...0,95

В электротехнической практике для оценки степени загруженности оборудования, в частности электрических машин и аппаратов, используется коэффициент нагрузки, обозначаемый как k_n . Этот параметр является важным индикатором, позволяющим понять, насколько эффективно используется потенциал оборудования в реальных условиях эксплуатации. По сути, коэффициент k_n представляет собой отношение непосредственно между фактической нагрузкой, которую испытывает устройство, и его номинальной мощностью или током, указанными производителем в технических характеристиках. Таким образом, k_n дает представление о том, работает ли оборудование в оптимальном режиме, перегружено или недогружено.

Особое внимание следует уделить функционированию силовых полупроводниковых приборов (ПП) в составе различных электротехнических систем. В отличие от ситуаций, когда ПП используются для плавного регулирования параметров электрической цепи, режимы коммутации, т.е. быстрого включения и выключения, представляют собой повышенную опасность для этих компонентов. Это связано с возникновением переходных процессов, которые сопровождаются кратковременными, но очень мощными импульсами тока. Данные импульсные токи могут значительно, в разы, превышать значения токов, установившихся в нормальном, стационарном режиме работы.

Для иллюстрации рассмотрим примеры из практики эксплуатации электроприводов. При запуске электродвигателя (ЭД), в момент, когда ротор начинает вращаться, возникает так называемый пусковой ток. Величина этого тока может быть колоссальной и в некоторых случаях достигать десятикратного превышения номинального тока двигателя. Такие высокие токи создают значительные электродинамические и тепловые нагрузки на все элементы цепи, в том числе силовые ПП. Ситуация становится еще более напряженной при реверсивных режимах работы или при повторных, частых включениях асинхронного двигателя (АД) в электрическую сеть. В этих случаях, пиковые значения тока могут возрастать еще больше, достигая, по некоторым данным, восемнадцатикратного превышения номинала [3].

Наиболее критические условия для силовых ПП могут появляться при отключении заторможенного асинхронного двигателя. В момент размыкания цепи, особенно если двигатель обладает значительной инерцией и накопленной энергией в обмотках, возникают коммутационные процессы, которые приводят к резкому увеличению коммутируемых токов. Согласно проведенным исследованиям, в подобных ситуациях токи, проходящие через силовые ПП, могут возрастать до семи раз по сравнению с номинальными значениями. Такие экстремальные режимы работы существенно повышают риск повреждения ПП и требуют принятия специальных мер для защиты и обеспечения надежности системы.

В контексте судового электрооборудования, надежность электроприводов (ЭП) играет критически важную роль. Анализ асимметричных аварийных режимов работы асинхронных двигателей, которые могут быть вызваны отказами силовых полупроводниковых приборов в системе управления, позволяет оценить степень негативного влияния таких отказов на другие, исправно функционирующие компоненты системы. Это особенно важно для понимания последствий аварий и разработки стратегий по их минимизации. В судовых электроприводах отказ даже одного элемента может привести к серьезным последствиям для работы всего судна.

В теории электротехники выделяют несколько основных типов асимметрий в трехфазных системах, которые могут возникать из-за неисправностей в управляющих цепях силовых ПП.

Первый тип – это внутрифазовая асимметрия. Она характеризуется тем, что угол рассогласования $\Delta\alpha$ между моментами включения встречно-параллельных тиристоров является одинаковым для всех трех фаз (это может быть вызвано, например, общим смещением моментов управления во всех фазах) [15].

Второй тип – междофазовая асимметрия. В данном случае угол рассогласования $\Delta\alpha$ равен нулю, т.е. встречно-параллельные тиристоры в каждой фазе открываются симметрично. Однако сами углы открытия тиристоров различаются между разными фазами (упомянутое может быть обусловлено различиями в параметрах управляющих импульсов или же несимметрией элементов схемы управления).

Наконец, существует общая асимметрия, которая представляет собой комбинацию первых двух типов. При общем виде асимметрии возникает угловое смещение $\Delta\alpha$, а также различия в углах включения тиристоров между фазами – это наиболее сложный и распространенный тип асимметрии, обусловленный разнообразными факторами. Исследования 3-фазной системы с тиристорным коммутатором и активной индуктивной нагрузкой [16] показали: отсутствуют постоянная компонента и гармоники с частотами,

кратными трём при внутрифазной асимметрии в выходном напряжении, благодаря симметрии фаз относительно 0. При междуфазной асимметрии постоянная составляющая также не фиксируется, однако, четные гармоники пропадают, это объясняется характером искажений формы напряжения в рассматриваемом обстоятельстве.

Наиболее сложный спектральный состав напряжения наблюдается непосредственно при общей асимметрии. В этом случае в выходном напряжении появляется полный спектр гармонических составляющих, в том числе постоянная составляющая, а также гармоники всех порядков. Таким образом все рассмотренные режимы асимметрии приводят к искажению синусоидальной формы напряжения, что может негативно сказываться на работе подключенного оборудования.

При изучении работы асинхронного двигателя, работающего от трёхфазного несинусоидального напряжения, часто применяют упрощённый метод анализа. Он предполагает, что основные параметры двигателя – сопротивления и индуктивности – при фиксированном скольжении s остаются неизменными,

независимо от мгновенных значений напряжения и тока. Этот метод позволяет рассматривать асинхронный двигатель как совокупность нескольких условных электродвигателей, объединённых на одном механическом валу [17]. Каждая гармоника входного напряжения моделируется отдельной схемой замещения, которая описывает электрические процессы на соответствующей частоте. Например, если напряжение содержит третью гармонику, для её анализа строится отдельная эквивалентная схема. При этом сопротивления ротора (активное и индуктивное) изменяются в зависимости от частоты гармонической составляющей ν . Эквивалентную Г-образную схему замещения для конкретной гармоники напряжения U_{sv} можно найти в специализированных источниках, таких как [3].

Данный метод помогает выявлять влияние высших гармоник на характеристики двигателя, что, в свою очередь, позволяет разрабатывать способы их компенсации или уменьшения, например, с помощью фильтров или корректировки параметров питания.

Электромагнитный момент M для заданной гармоники вычисляется по следующей зависимости

$$M_\nu = \frac{m_s U_{sv}^2 (1 + g_\nu s_\nu)}{\sigma^2 R'_{rH} s_\nu \omega_0 \nu \left(\left(\frac{R_s}{\sigma R'_{rH}} + g_\nu + \frac{1}{s_\nu} \right)^2 + \left(\frac{X_{KH}}{\sigma^2 R'_{rH}} \right)^2 \nu^2 \varepsilon_\nu^2 \right)}, \quad (20)$$

где g_ν – расчетный коэффициент, специфичный для данной гармоники; s_ν – величина скольжения, применяемая для данной гармоники в полях прямой и обратной последовательности; σ – коэффициент рассеяния; R'_{rH} , X_{KH} – номинальные значения приведённого сопротивления (активного типа) роторной обмотки, а также индуктивного сопротивления при коротком замыкании в номинальном режиме; ε_ν – относительные значения сопротивления, являющегося индуктивным.

Механические характеристики в системах с тиристорным коммутатором и асинхронным двигателем

Анализ механических свойств электродвигателя, выполненный в условиях квазиустановившегося режима с учетом введенных допущений, позволяет сделать вывод: при наличии внутрифазовых несимметрий итоговый электромагнитный момент определяется соотношением, означающим минимальное искажение характерной кривой результирующего момента

$$M = \sum M_{\nu np}, \quad (21)$$

где $\sum M_{\nu np}$ – суммарный момент, формируемый гармониками прямой последовательности.

В случае межфазовых несимметрий расчет момента производится по формуле

$$M = \sum M_{\nu 1np} + \sum M_{\nu 1ob}, \quad (22)$$

где $\sum M_{\nu 1np}$, $\sum M_{\nu 1ob}$ – итоговые моменты, обусловленные нечетными гармониками для прямой и обратной последовательностей полей соответственно.

Если же несимметрия носит общий характер, итоговый момент определяется суммой

$$M = \sum M_{\nu np} + \sum M_{\nu ob} + M_{nc}, \quad (23)$$

где $\sum M_{\nu ob}$ – момент, вызванный гармониками обратной последовательности; M_{nc} – постоянная составляющая, которая формируется непосредственно за счет постоянной токовой компоненты.

Замечания по деформациям механических параметров

Стоит отметить, что зависимости механических характеристик (АД) от момента M , выраженные через функцию $\omega_r = f(M)$, при наличии общей несимметрии существенно искажаются. При этом величины моментов, соответствующие прямой и обратной последовательностям, вычисляются непосредственно с использованием формул (18), (19), а постоянная составляющая в выражении (23) определяется значением постоянной токовой компоненты.

Аварийные режимы работы АД, связанные непосредственно с несимметрией, классифицируются всего на 4 категории в зависимости от типа и степени отклонения от нормы.

1. Квазинормальные режимы.

1-я группа включает режимы, вызванные незначительными технологическими погрешностями или умеренными отклонениями в настройках преобразовательных комплексов (ПК) при эксплуатации. Эти ситуации считаются относительно безопасными и часто возникают вследствие естественного износа оборудования или временных колебаний параметров сети.

2. Частично управляемые режимы

Ко 2-й группе относятся асимметричные состояния, спровоцированные сбоями в СУ или её частичной деградацией. Такие режимы нарушают стабильность ЭП, но сохраняют при этом возможность его корректировки без полной потери функциональности. Например, локальные сбои в алгоритмах регулирования могут привести к кратковременным перегрузкам, не требующим при этом выполнения экстренного отключения системы.

3. Режимы при частичных повреждениях.

Третья группа включает состояния непосредственно при пробоях отдельных силовых ПП. Отсутствие постоянной составной части, чётных гармоник в токе минимизирует искажения параметров, снижая при этом риск серьёзных последствий. Однако надо сказать, что требуется оперативное вмешательство с целью предотвращения развития неисправности.

4. Критические режимы торможения динамического типа.

Наиболее опасны режимы четвёртой группы, при которых блокируется один или несколько ПП. В упомянутых обстоятельствах возникает постоянная составляющая момента M_{nc} [формула (23)], вызывающая динамическое торможение. Его величина зависит непосредственно от постоянной токовой составляющей, ограниченной непосредственно активным сопротивлением обмоток АД, это приводит к искажению механических параметров силового агрегата. Исправные ПП в такой ситуации вынуждены работать с повышенной нагрузкой, особенно если момент сопротивления M_c на валу остаётся неизменным до и непосредственно после возникновения асимметрии. Детальный анализ данных режимов представлен в [15].

Вывод

В современных условиях особое значение приобретает изучение асимметричных режимов АД в составе автономных ЭЭС. Это связано с необходимостью точного моделирования характеристик напряжения и тока для оценки их воздействия как на сам двигатель, так и на функционирующие ПП. Подобные исследования позволяют разрабатывать превентивные меры, повышающие надёжность судового и промышленного оборудования в условиях нестабильных нагрузок и внешних воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков А.Ф. Техническая эксплуатация электроприводов судов : монография. Москва : ИНФРА-М, 2020. 358 с. (Научная мысль). doi:10.12737/1048423
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2 т. Т. 1. Москва : ИД МЭИ, 2006. 650 с.
3. Бурков А.Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов : монография. Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2011. 417 с.
4. Адкинс Б. Общая теория электрических машин : пер. с англ. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
5. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. Москва : Высшая школа, 1980. 264 с.
6. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. Москва : Энергия, 1968. 264 с.
7. Трещев И.И. Несимметричные режимы судовых машин переменного тока. Ленинград : Судостроение, 1965. 248 с.
8. Основные нештатные режимы судовых электромашин / Н.Е. Жадобин, М.А. Сюбаев, В.Ф. Мищенко, И.И. Соломонова. Санкт-Петербург : ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2003. 80 с.
9. Трещев И.И. Методы исследования электромагнитных процессов в машинах переменного тока. Ленинград : Энергия, 1969. 236 с.
10. Системы тиристорного управления судовыми электромеханизмами / А.П. Богословский, Е.М. Певзнер, М.С. Туганов, А.Г. Яуре. Ленинград : Судостроение, 1978. 232 с.
11. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 233 с.
12. Рябчинский А. Гибридные контакторы серии CONTACTRON // Энергетика и промышленность России. 2010. № 17(157). С. 9.
13. Бурков А.Ф. Надежность судовых электроприводов. Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. 204 с.
14. Кузнецов С.Е., Филев В.С. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и автоматики. Санкт-Петербург : Судостроение, 1995. 448 с.
15. Туганов М.С. Судовой бесконтактный электропривод. Ленинград : Судостроение, 1978. 288 с.
16. Туганов М.С., Кулешов В.И., Фархутдинов Ф.Х. Обобщенный метод исследования электромагнитных процессов в системе «трехфазный тиристорный коммутатор–индуктивно-активная нагрузка» // Электричество. 1976. № 9. С. 77–80.
17. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. Москва : Энергия, 1973. 400 с.

REFERENCES

1. Burkov A.F. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya elektroprivodov sudov [Technical operation of ship electric drives] : monographiya. Moskva : INFRA-M, 2020. 358 s. (Nauchnaya mysl'). doi:10.12737/1048423
2. Ivanov-Smolensky A.V. Elektricheskiye mashiny [Electric machines]. V 2 t. T. 1. Moskva : ID MPEI, 2006. 650 s.
3. Burkov A.F. Povyshenie effektivnosti tekhnicheskoy ekspluatatsii sudovykh elektroprivodov [Improving the efficiency of technical operation of ship electric drives] : monographiya. Vladivostok : Mor. gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 417 s.
4. Adkins B. Obshchaya teoriya elektricheskikh mashin [General theory of electrical machines] : per. s angl. Moskva ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1960. 272 s.
5. Kopylov I.P. Primenenie vychislitel'nykh mashin v inzhenerno-ekonomicheskikh raschetakh [Application of computers in engineering and economic calculations]. Moskva : Vysshaya shkola, 1980. 264 s.
6. Petrov I.I., Meistel A.M. Spetsial'nye rezhimy raboty asinkhronnogo elektroprivoda [Special operating modes of an Asynchronous Electric drive]. Moskva : Energiya, 1968. 264 s.
7. Treshchev I.I. Nesimmetrichnyie rezhimy sudovykh mashin peremennogo toka [Asymmetrical modes of marine AC machines]. Leningrad : Sudostroenie, 1965. 248 s.
8. Osnovnye neshtatnye rezhimy sudovykh elektromashin [Basic abnormal modes of marine electric machines] / N.E. Zhadobin, M.A. Syubaev, V.F. Mishchenko, I.I. Solomonova. Sankt-Peterburg: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2003. 80 s.
9. Treshchev I.I. Metody issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v mashinakh peremennogo toka [Methods of studying electromagnetic processes in alternating current machines]. Leningrad : Energiya, 1969. 236 s.
10. Sistemy tiristornogo upravleniya sudovymi elektromekhanizmami [Thyristor control systems for marine electrical mechanisms] / A.P. Bogoslovsky, E.M. Pevzner, M.S. Tuganov, A.G. Yaure. Leningrad : Sudostroyeniye, 1978. 232 s.
11. Mogilevsky G.V. Gibridnye elektricheskie apparaty nizkogo napryazheniya [Low-voltage hybrid electrical apparatus]. Moskva : Energoatomizdat, 1986. 233 s.
12. Ryabchinsky A. Gibridnyie kontaktory serii CONTACTRON [CONTACTRON series hybrid contactors] // Energetika i promyshlennost' Rossii. 2010. № 17(157). S. 9.
13. Burkov A.F. Nadezhnost' sudovykh elektrprivodov [Reliability of ship electric drives]. Vladivostok : Dal'nevost. federal. un-t, 2014. 204 s.
14. Kuznetsov S.E., Filev V.S. Osnovy tekhnicheskoy ekspluatatsii sudovogo elektrooborudovaniya i avtomatiki [Fundamentals of technical operation of ship electrical equipment and automation]. Sankt-Peterburg : Sudostroenie, 1995. 448 s.
15. Tuganov M.S. Sudovoy beskontaktny elektroprivod [Marine contactless electric drive]. Leningrad : Sudostroenie, 1978. 288 s.
16. Tuganov M.S., Kuleshov V.I., Farkhutdinov F.Kh. Obobshchennyi metod issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v sisteme «trekhfaznyy tiristorny kommutator – induktivno-aktivnaya nagruzka» [Generalized method for studying electromagnetic processes in the system «three-phase thyristor switch – inductive-active load»] // Elektrichestvo. 1976. № 9. S. 77–80.
17. Kopylov I.P. Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii [Electromechanical energy converters]. Moskva : Energiya, 1973. 400 s.

Информация об авторах

А.Ф. Бурков – доктор технических наук, доцент, профессор Департамента энергетических систем Политехнического института;
К.В. Ковальский – аспирант Департамента энергетических систем Политехнического института;
Нгуен Ван Ха – соискатель Департамента энергетических систем Политехнического института.

Information about the authors

A.F. Burkov – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Energy Systems of the Polytechnic Institute;
K.V. Kovalsky – Postgraduate Student, Department of Energy Systems of the Polytechnic Institute;
Nguyen Van Kha – Applicant, Department of Energy Systems of the Polytechnic Institute.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 20.03.2025.
The article was submitted: 24.02.2025; approved after reviewing: 20.03.2025; accepted for publication: 20.03.2025.

Научная статья
УДК 656.073.5
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-19-27

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО БИЗНЕС-БЛОКА В УСЛОВИЯХ РОСТА ГРУЗОПОТОКА

Власова Наталья Васильевна¹, Брытков Владимир Сергеевич²

^{1, 2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск
natalya.vlasova.76@list.ru
vladimirbrytkov99@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД», представлена организационная структура транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» для распределения функций между бизнес-единицами и организации системы управления. В целях обеспечения долгосрочного устойчивого развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» предложены технические решения, направленные на повышение эффективности развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД». Проведен комплексный анализ внешних факторов влияния и внешней среды: тенденции отрасли транспортно-логистических услуг (ТЛУ) и глобальные факторы макросреды, позволяющие спрогнозировать развитие российской и мировой экономики за счет интеграции новых регионов в долгосрочной перспективе внутрироссийских перевозок, которые возрастут в среднем на 0,8 % в год до 919 млн т к 2036 г. Развитие функционала транспортно-логистического бизнеса (ТЛБ) будет обеспечиваться поступательным ростом базовых услуг экспедирования, транспортно-логистических сервисов терминально-складской деятельности, консолидацией сквозных ТЛУ и усложнением интегрированных цепей поставок. Приоритетная задача исследования – практическое подтверждение возможности развития сети терминально-логистического центра (ТЛЦ), что позволит привлечь дополнительный объем грузовой базы и клиентов на сеть ОАО «РЖД», сократить критический износ основных фондов зданий и машин, а также увеличить пропускную способность инфраструктуры. Полученные результаты показали, что строительство и модернизация ТЛЦ является стратегическим шагом, направленным на улучшение качества предоставляемых услуг, увеличение объемов перевозок грузов и оптимизацию логистических процессов как внутри холдинга, так и при взаимодействии с внешними клиентами.

Ключевые слова: транспортно-логистический бизнес-блок холдинга «РЖД», модернизация ТЛЦ, грузовые перевозки, услуги, цифровые сервисы, логистика, доходы, инфраструктура, клиент

Original article

ISSUES OF DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS BUSINESS BLOCK IN CONDITIONS OF GROWTH OF FREIGHT FLOW

Vlasova Natalya Vasilievna¹, Brytkov Vladimir Sergeevich²

^{1, 2} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia
natalya.vlasova.76@list.ru
vladimirbrytkov99@yandex.ru

Abstract. The article discusses the development of the transport and logistics business of the Russian Railways Holding Co., presents the organizational structure of the transport and logistics business of the Russian Railways Holding Co. with the aim of distributing functions between business units and organizing the management system. In order to ensure long-term sustainable development of the transport and logistics business of the Russian Railways Holding Co., technical solutions have been proposed aimed at increasing the efficiency of development of the transport and logistics business of the Russian Railways Holding Co. A comprehensive analysis of external influence factors and the external environment was carried out, including the trends in the transport-and-logistics services (TLS) industry and global macroenvironmental factors that make it possible to predict the development of the Russian and global economy through the integration of new regions in the long term of domestic transportation, which will grow by an average of 0,8 % per year to 919 million tons by 2036. The development of the transport-and-logistics business (TLB) functionality will be ensured by the progressive growth of basic forwarding services, transport-and-logistics services of terminal-and-warehouse activities, the consolidation of end-to-end TLS and the complication of integrated supply chains. The priority objective of the study is practical confirmation of the possibility of developing the terminal-and-logistics center (TLC) network, which will allow attracting additional freight base and customers to the Russian Railways network, reducing the critical wear and tear of fixed assets of buildings and machinery, as well as increasing the capacity of the infrastructure. The results obtained showed that the construction and modernization of the TLC is a strategic step aimed at improving the quality of services provided, increasing the volume of cargo transportation and optimizing logistics processes, both within the holding company and in interaction with external clients.

Keywords: transport and logistics business block of the Russian Railways Holding Co., modernization of TLC, freight transportation, services, digital services, logistics, income, infrastructure, client

Введение

Транспортно-логистический бизнес-холдинг «РЖД» выполняет важную роль в обеспечении государственных и социальных задач, осуществляя обслуживание государственного заказа, моногородов, социальных перевозок и развитие новых территорий. Основное направление транспортно-логистического бизнеса ТЛБ – распределение функций между бизнес-единицами и организация системы управления; соблюдение принципов организации системы сбыта услуг, приоритетных направлений развития и системы учета доходов от реализации комплексных продуктов и услуг; мероприятия по развитию ТЛБ.

Основные задачи бизнес-холдинга «РЖД»:

- увеличение доли холдинга «РЖД» на рынке транспортно-логистических услуг;
- повышение клиентоориентированности и качества обслуживания;
- увеличение доли доходов от транспортно-логистической деятельности в структуре доходов холдинга «РЖД»;
- достижение конкурентного баланса между бизнес-единицами ТЛБ при оказании услуг внешним клиентам;
- создание открытой логистической экосистемы на базе ИТ-возможностей холдинга «РЖД» для интеграции компетенций и ресурсов логистических операторов различных видов транспорта.

В динамично меняющихся условиях внешней среды существуют предпосылки к созданию особых требований к стабильности, эффективности и безопасности организации перевозочных процессов. Стратегическим приоритетом ТЛБ холдинга «РЖД» является совершенствование 3-4PL-услуг, развитие сквозных транспортно-логистических услуг «от двери до двери», предоставление экономически обоснованных продуктов ТЛБ в формате «единого окна», интеграция глобальных цепей поставок, создание ИТ-платформы и компетенций для подготовки к выходу продуктов в спектр 5PL-услуг. ТЛБ холдинга «РЖД» реализует комплексные логистические услуги с задействованием собственных объектов инфраструктуры, использованием подвижного состава и универсальной тары, высокотехнологичной упаковки и спецсредств, применением решений цифровой трансформации, синергии компетенций ТЛУ в ключевых грузообразующих регионах.

В настоящее время национальный транспортный комплекс осуществляет функционирование в условиях значительных ограничений, одновременно создающих новые возможности при высокой волатильности транспортно-логистического рынка. Ключевые ограничения развития ТЛБ – это логистические риски и барьеры для импортно-экспортных и транзитных перевозок в долгосрочном периоде, отражающие сокращение ресурсной базы ТЛУ

к 2030 г., высокую вероятность дефицита пропускных и провозных мощностей международных транспортных коридоров (МТК), проходящих по территории Российской Федерации (преимущественно маршрутов МТК «Восток–Запад»), при увеличивающемся спросе на комплексные транспортно-логистические сервисы [1, 2].

Для создания комплексных ТЛУ национальная сеть объектов инфраструктуры развивается в соответствии с обновленным распределением грузопотоков, предусматривая растущие потребности в части объема перевозок и расширения номенклатуры грузов. Реализация инфраструктурных проектов, запланированных до 2030 г., позволит минимизировать ограничения пропускных и провозных способностей железнодорожных участков и создать резервы роста грузопотоков в период до 2036 г. Развитие функционала ТЛБ будет обеспечиваться поступательным ростом базовых услуг экспедирования, транспортно-логистических сервисов терминально-складской деятельности, консолидацией сквозных ТЛУ и усложнением интегрированных цепей поставок. Консолидация и объединение компетенций, включая выполнение мультимодальных перевозочных процессов, осуществляется Центром фирменного транспортного обслуживания – филиалом ОАО «РЖД» (ЦФТО).

Направления развития ТЛБ холдинга «РЖД» на период до 2036 г.:

- обеспечение роста объема и доходности ТЛУ за счет маркетинговой политики и оптимизации издержек;
- привлечение дополнительных грузопотоков на инфраструктуру ОАО «РЖД» и повышение доходности путем предложения клиентам комплексных ТЛУ;
- развитие транзитного потенциала национального транспортного комплекса [2].

1. Основные направления развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

В целях обеспечения долгосрочного устойчивого развития транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» определены следующие направления деятельности.

1. Рост сквозных транспортно-логистических услуг:

- адаптация ТЛУ к потребностям грузоотправителей и разработка новых комплексных продуктов;
- развитие комплексных ТЛУ для обеспечения клиентоориентированного подхода при формировании интегрированных цепей поставок, привлечения высокодоходных грузов и транзитных грузопотоков;
- разработка и реализация мероприятий, направленных на повышение качества ТЛУ, в том числе при оптимизации транзитного времени доставки грузов для всех видов отправок;

- разработка подходов к диверсификации продуктового портфеля холдинга «РЖД»;
- увеличение доли отправок, доставленных в нормативные сроки;
- ускоренное развитие логистических активов и технологий;
- удовлетворение спроса клиентов на перевозку уменьшенных товарных партий;
- повышение эффективности и устойчивости ТЛБ холдинга «РЖД» на евразийском рынке ТЛУ;
- трансформация сквозных логистических цепей ввиду строительства новых транспортно-логистических центров (ТЛЦ) в собственности холдинга «РЖД», в государственной и частной собственности;
- освоение новых видов подвижного состава и методов доставки грузов железнодорожным транспортом в кооперации с другими видами транспорта [3].

2. Организационное направление:

- развитие логистического аутсорсинга в соответствии с запросами национальной промышленности;
- выстраивание долгосрочных отношений с грузовладельцами на основе внедрения сквозной системы управления (планирования) в сфере мультимодальных перевозок для формирования гарантированной грузовой базы и проактивного планирования инфраструктурных мероприятий, обеспечивающих потребности комплексных ТЛУ. Проактивное планирование в транспортной логистике представляют собой предвидение препятствий, разработку стратегии в случае возникновения форс-мажорных обстоятельств и создание дорожной карты для достижения целей. Задача проактивного планирования – определение сроков планирования и принятие оперативного решения в потребности и реализации комплексных транспортно-логистических услуг в мультимодальных перевозках;
- синхронизация данных по бизнес-процессам и бизнес-единицам;
- применение единых национальных стандартов качества транспортно-логистических услуг как дополнительного инструмента укрепления конкурентных позиций холдинга «РЖД»;
- внедрение и развитие единой системы управления взаимоотношениями с клиентами ТЛБ и единого каталога стандартизированных услуг в холдинге «РЖД»;
- повышение эффективности ТЛБ на основе достижения синергетического эффекта как результата скоординированного согласованного взаимодействия и интеграции бизнес-процессов ТЛБ.

3. Маркетинговое направление:

- проведение проактивной работы с грузоотправителями, у которых планируется прирост погрузки или имеется существенный объем перевозок, осуществляемый в настоящее время другими видами транспорта, для определения их потребностей и требований

к оказываемым ТЛУ, в том числе среди предприятий малого и среднего бизнеса;

- развитие коммерческих отношений с контрагентами, операторами специализированного подвижного состава, владельцами объектов коммерческой инфраструктуры;
- укрепление взаимодействия с промышленными и сельскохозяйственными холдингами в определении среднесрочных и долгосрочных параметров развития потенциальной грузовой базы для железнодорожных перевозок;
- формирование подхода к трансформации позиций холдинга «РЖД» на российском и мировом рынках ТЛУ, в том числе за счет усиления влияния МТК «Север–Юг» [3–5].

4. Тарифное направление:

- взаимодействие с профильными подразделениями ОАО «РЖД» по вопросам совершенствования тарифной политики;
- формирование актуализированных предложений развития тарифной политики в конкурентных сегментах рынка ТЛУ для рассмотрения причастными подразделениями;
- внедрение современных методов стимулирования грузоотправителей, обеспечивающих повышенные объемы грузов, предъявляемых к перевозке.

5. Технологическое направление:

- расширение присутствия импортонезависимого подвижного состава, модульных вагонов, стандартизация и взаимозаменяемость рабочего парка на сети железных дорог;
- развитие системы сбыта грузовых перевозок и логистических продуктов путем расширения цифровой трансформации, возможностей для дистанционных продаж и взаимодействия со сбытовыми подразделениями холдинга «РЖД»;
- создание единого информационного пространства ТЛБ для повышения доходности грузо-перевозок и логистического бизнеса;
- создание омниканальной цифровой инфраструктуры между сервисами ОАО «РЖД» и его дочерними, зависимыми и иными подконтрольными ОАО «РЖД» обществами (ДЗО) в рамках ТЛБ с позиций клиентоцентричности, с единым интерфейсом, выводными формами и аналитическими дашбордами для руководителей холдинга «РЖД». Омниканальная цифровая инфраструктура – маркетинговый термин, обозначающий взаимную интеграцию разрозненных каналов коммуникации в единую систему, с целью обеспечения непрерывной коммуникации сервисов ОАО «РЖД» и ДЗО. Дашборд – инструмент управления бизнесом, который позволяет визуально отображать ключевые показатели эффективности компании и анализировать данные в режиме реального времени. В настоящее время

существует большое многообразие цифровых ресурсов, и на их обработку у руководителей уходят большие трудозатраты времени, в связи с чем необходимо создать для них некий единый интерфейс в рамках ТЛБ;

- интеграция интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и системы управления комплексными ТЛУ, внедрение цифровых транспортно-логистических платформ (ЦТЛП), формирование сквозных цифровых технологий для повышения эффективности ТЛУ;

- обеспечение «бесшовности» информационных систем взаимодействия филиалов, бизнес-единиц и клиентов, транзакций, платежей, клиентских сервисов [6].

6. Инфраструктурное направление:

- развитие терминально-складской деятельности;
- создание разветвленной сети универсальных городских терминалов;

- рост транспортно-логистических центров и ЖДПП на ключевых маршрутах МТК «Север–Юг», а также в Азово-Черноморском и восточном направлениях, включая ТЛЦ на погранпереходах;

- расширение грузовых терминалов ОАО «РЖД» для формирования грузового транспортно-логистического каркаса в Московском и Санкт-Петербургском транспортных узлах;

- приведение инфраструктуры в соответствие с требованиями корпоративного стиля ОАО «РЖД» с созданием современных офисов обслуживания клиентов;

- реализация программы замещения погрузочно-разгрузочной техники и механизмов, выведенных из эксплуатации;

- автоматизация и цифровизация основных производственных и технологических процессов работы терминально-складского комплекса;

- развитие сервиса по перевозке сборных и мелких партий грузов в 5- и 10-футовых среднетоннажных контейнерах, что принесет ряд дополнительных эффектов для многих сфер экономики страны: для железнодорожного транспорта повысится конкурентоспособность и эффективность использования инфраструктуры; для грузовладельцев увеличится транспортная доступность территорий и рынков сбыта, а также улучшится доступность перевозок. Новая разработка привлечёт дополнительные объёмы на железнодорожный транспорт, и при современной обработке грузов, слаженной координации по взаимодействию с автомобильным транспортом и наличии централизованного управления это обеспечит организацию высокоэффективного сервиса на множестве терминалов страны [14];

- определение целесообразности разработки и внедрения технологии перегрузки контейнеров из вагона в вагон по прямому варианту без расфор-

мирования контейнерных поездов на транзитных перегрузочных станциях.

2. Организационная структура транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

Транспортно-логистический бизнес-холдинг «РЖД» представлен Центром фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО), Центральной дирекцией по управлению терминально-складским комплексом – филиалом ОАО «РЖД» (ЦМ), а также ДЗО: АО «РЖД Логистика», АО «РЖД Бизнес Актив», АО «Федеральная грузовая компания» (АО «ФГК»), АО «Объединенная транспортно-логистическая компания – Евразийский железнодорожный альянс» (АО «ОТЛК ЕРА»), ООО «РЖД Терминал», ООО «ТЛЦ «Белый Раст» (рис. 1).

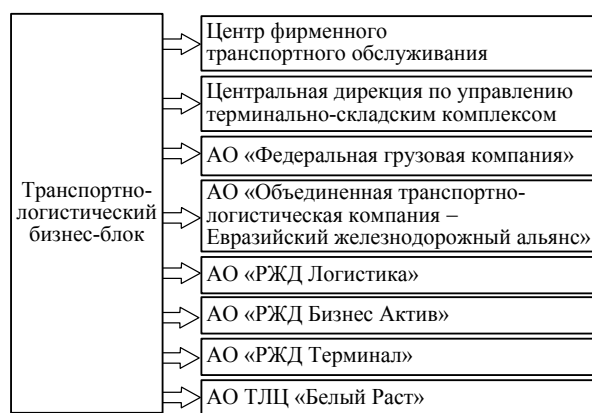


Рис. 1. Организационная структура транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД»

Чтобы объединить компетенции холдинга в организации перевозочного процесса и в области логистической деятельности, включая организацию грузопотоков, комплекс услуг по обработке грузов (терминально-складская деятельность, сопутствующие услуги) и работу с клиентами, в холдинге создан транспортно-логистический бизнес-блок, куда входят профильные ДЗО, филиалы и структурные подразделения ОАО «РЖД».

Без единства ТЛБ холдинга и распределения функций между бизнес-единицами невозможно организовать систему управления организацией сбыта услуг, определение верхнеуровневых целей для долгосрочного планирования в бизнес-единицах в периметре транспортно-логистического бизнес-холдинга «РЖД» с вектором на формирование синергетических эффектов от скоординированного взаимодействия, обеспечение эффективного взаимодействия бизнес-единиц ТЛБ в освоении целевых сегментов транспортно-логистического рынка [7].

3. Определение базовой услуги холдинга «РЖД»

Основой выполнения обязательств холдинга «РЖД» перед клиентским сообществом, таких как перевозка, в соответствии с согласованными заявками

формы ГУ-12, и предлагаемые дополнительные услуги, являются утвержденный нормативный график движения поездов и техническое нормирование эксплуатационной работы на предстоящий месяц. Оказание традиционных базовых услуг по перевозке грузов и реализацию дополнительного комплекса транспортных продуктов, соотнесенных с возможностями инфраструктуры, формируют планируемые финансовые показатели.

Перспективная интерпретация базовой услуги холдинга «РЖД» включает в себя следующие элементы.

1. «РЖД» как естественная монополия: предоставление инфраструктуры и тяги, т.е. перевозка от железнодорожной станции до железнодорожной станции.

2. «РЖД» как участник рыночной среды:

- терминально-складское обслуживание;
- цифровые и информационные услуги;
- оперирование подвижным составом;
- контейнерные перевозки;
- комплексная логистика;
- тарирование и упаковка;
- разработка схем организации перевозочного процесса;

- таможенные услуги;
- специальные перевозки;
- строительство и проектирование ТЛЦ;
- развитие коммерческой инфраструктуры.

3. Услуги, оказываемые совместно с партнерами:

- управление цепями поставок;
- транзитные перевозки;
- финансовые и страховые услуги;
- организация перевозок на «первой и последней миле», автомобильные перевозки;
- морские и стивидорные услуги;
- международная логистика;
- сервисы для малого и среднего бизнеса;
- перевозки для частных лиц;
- предоставление подвижного состава, не находящегося в собственности холдинга «РЖД»;
- формирование ценовых индикаторов железнодорожных услуг на бирже.

Тарифы на услуги по использованию инфраструктуры и железнодорожные перевозки в значительной мере регулируются со стороны государства, что очень серьезно ограничивает потенциал получения прибыли. В результате денежный поток от основной деятельности компании-перевозчика не способен покрыть перспективную потребность в инвестиционных ресурсах для развития инфраструктуры, что уже в среднесрочной перспективе вызовет отставание возможностей холдинга «РЖД» от потребностей рынка. Отсутствие же единой системы продаж транспортно-логистических услуг ведет в рамках холдинга «РЖД» к увеличению затрат на сбыт, низкой осведомленности о предоставляемых услугах в разных подразделениях транспортно-логистического бизнес-блока, отсутствию проактив-

ных продаж, недостаточной эффективности системы сбыта. В связи с этим развитие интеграции и скоординированного взаимодействия бизнес-единиц ТЛБ холдинга «РЖД» усиливает конкурентоспособность национальной сферы ТЛУ, содействует реализации государственных программ, национальных и федеральных проектов, оптимизации цепей поставок российских промышленных предприятий, развитию транспортных коридоров, проходящих по территории Российской Федерации [8].

Реализация сквозных транспортно-логистических услуг на основе синергии бизнес-единиц ТЛБ формирует эффективное логистическое обслуживание, предусматривающее обеспечение логистики снабжения, сбыта и внутризаводской логистики, международных мультимодальных перевозок, включая:

- разработку интегрированных мультимодальных сервисов в целях обеспечения стабильности, эффективности и безопасности комплексных ТЛУ;
- интеграцию бизнес-единиц в едином информационном пространстве для организации мультимодальных грузовых перевозок, предоставления возможностей сокращения временных и финансовых затрат организации перевозок;

– внедрение дополнительных цифровых сервисов в системе управления взаимоотношениями с клиентами, создание единой доверенной среды с участниками транспортного рынка;

– расширение ввода клиентоориентированных цифровых технологий с информационным сопровождением на всем пути следования от поставщика до потребителя, обеспечение цифрового контроля за дислокацией и безопасностью перевозимого груза;

– повышение эффективности функционирования транспортно-логистических сервисов на объектах инфраструктуры в рамках пограничных переходов, внедрение новых технических средств контроля; соблюдение временных нормативов на пограничных станциях и пунктах пропуска через государственную границу. Трансграничная интероперабельность – это способность информационных систем (ИС) ОАО «РЖД» взаимодействовать с информационными системами ДЗО. Такое взаимодействие может быть выражено в форме обмена данными, распределенного выполнения поисковых запросов, согласованного изменения базы данных и т.д. Необходимость обеспечения совместимости возникает при связывании бизнес-процессов предприятий партнеров, согласовании работы, существующей ИС с принятыми стандартными решениями;

– развитие системы сквозного планирования грузовых перевозок с разработкой соответствующих информационных сервисов, направленных на реализацию возможностей объектов инфраструктуры и клиентоориентированность [9].

Совершенствование взаимодействия бизнес-единиц ТЛБ в целях роста интеграции и достижения дополнительных синергетических эффектов

способствует усилению клиентоориентированности и повышению качества интегрированных транспортно-логистических услуг, совершенствованию цепочек поставок и внешнеторговой деятельности, росту объемов перевозок, сокращению временных затрат на перемещение грузов. Распределение ролей и функций бизнес-единиц при формировании комплексной транспортно-логистической услуги предусматривает совершенствование в нескольких сегментах, приоритетность которых должна определяться существующими трендами в развитии грузовых перевозок и ТЛУ, степенью конкурентности рыночной среды, наличием у бизнес-единиц ТЛБ наработанных компетенций, инвестиционными и инфраструктурными возможностями, а также конъюнктурой рынка ТЛУ.

В рамках взаимодействия при организации ТЛУ предусмотрен подход взаимной приоритетности: в случае привлечения соисполнителя используются в первую очередь бизнес-единицы ТЛБ, в случае отсутствия возможности происходит привлечение внешнего подрядчика. В целях обеспечения эффективности, качества, устойчивости и безопасности сквозных транспортно-логистических услуг в современных условиях экономической деятельности целесообразна регулярная актуализация внешних факторов влияния и внешней среды, контролируемых факторов влияния и внутренней среды, анализа основных рисков, вызовов и ограничений, ключевых направлений развития ТЛБ [10].

4. Анализ внешних факторов влияния и внешней среды. Тенденции отрасли ТЛУ и глобальные факторы макросреды

Анализ потребителей и поставщиков холдинга «РЖД» показывает, что граница отрасли холдинга «РЖД» локализована предоставлением транспортно-логистических услуг по перевозке массовых и контейнеризованных грузов как во внутреннем, так и в международном сообщении. Географические границы данной деятельности охватывают практически всю территорию Российской Федерации: протяженность железнодорожной сети, соединяющей 77 регионов, составляет 85,6 тыс. км. Внешнеэкономическая деятельность холдинга «РЖД» в сфере международной логистики распространяется преимущественно на рынки ЕАЭС, Монголии, Китая, Азербайджана, Узбекистана, Туркменистана и Ирана.

При этом ОАО «РЖД» активно участвует в деятельности международных организаций (ОСЖД, структуры ООН, Совет по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, ШОС, БРИКС и др.), в рамках которых обеспечивается развитие законодательной основы по всем направлениям сотрудничества, включая международные перевозки. Таким образом, транспортно-логистический бизнес-холдинг «РЖД» подвержен влияниям макросреды в части основных трендов отрасли ТЛУ. По результатам факторного анализа

на сферу транспортно-логистических услуг значительно влияют политические, экономические, социальные и технологические факторы, в особенности:

- введение в отношении Российской Федерации экономических санкций со стороны западных стран и их отказ от продукции отечественных производителей;

- сокращение деятельности в России крупных морских линий, запреты на страхование российских судов, снижение активности международных перевозчиков, усложнение функционирования западных пунктов пропуска;

- политическая и экономическая нестабильность;

- прямая зависимость темпов развития сферы ТЛУ Российской Федерации от потенциальных темпов экономического роста на рынках КНР, стран Восточной Европы, Центральной Азии, Индии и других торговых партнеров;

- ограничения на вывоз некоторых видов продукции.

В среднесрочной перспективе (3–5 лет) ожидается рост влияния тренда на использование аутсорсинга логистики, социальных факторов в виде роста заказов на услуги перевозчиков с удаленным оформлением договоров, значимости скорости и дополнительных функций доставки, а также технологических и экологических факторов.

При инерционном развитии российской и мировой экономики за счет интеграции новых регионов в долгосрочной перспективе основной объем грузовой базы в железнодорожной сети составит внутрироссийские перевозки, которые будут расти в среднем на 0,8 % в год до 919 млн т к 2036 г. (рис. 2). В структуре всех железнодорожных перевозок доля внутренних составит 53 %. Основной вклад в рост перевозок окажут металлы, руда, потребительские товары. Объем экспортных железнодорожных перевозок увеличится до 668 млн т к 2036 г., что на 56 % выше уровня 2022 г. Объем импортных грузоперевозок будет расти с темпом 1,3 % в год до 86 млн т к 2036 г. преимущественно за счет положительной динамики в транспортировке продукции химической промышленности, цветных и прочих металлов. Транзит железнодорожным транспортом через территорию Российской Федерации может вырасти до 63 млн т благодаря высоким темпам роста перевозок черных металлов, удобрений, потребительских товаров. Увеличение транзитных перевозок может также производиться за счет заключения партнерских соглашений с азиатскими перевозчиками для транспортировки на дальние расстояния и развития трансевразийских транзитных перевозок. В ТЛБ холдинга «РЖД» данную роль осуществляет АО «ОТЛК ЕРА», имеющее накопленный опыт в сегменте рынка [6, 11, 12].

Ожидается расширение границ отрасли экспортных перевозок по всем основным международным транспортным коридорам (МТК). Желез-

нодорожный транспорт играет важную роль в возможности адаптации экономики России к новым торговым отношениям с «дружественными» странами и переориентации грузопотоков в сторону стран Ближнего Востока, Азиатско-Тихоокеанского региона, БРИКС, Африки. Несмотря на существенный объем инвестиций в развитие провозных и пропускных возможностей железнодорожной инфраструктуры на МТК, для максимизации объемов международных перевозок необходима диверсификация направлений перевозок.

Вместе с тем необходимо отметить возрастающую конкуренцию как между различными международными транспортными коридорами, так и между видами сообщения на евразийском пространстве.

Относительно макроэкономических тенденций основных рынков сбыта российской продукции ожидаются разнонаправленные тенденции.

В среднесрочной перспективе темпы роста экономики Китая могут замедлиться с 5,6 % по итогам 2023 г. до 4,4 % в 2025 г. в связи с продолжающимся спадом на рынке недвижимости и негативными предпосылками по темпам роста экспорта страны в ближайшие годы.

В 2023–2024 гг. произошел минимальный рост (+1,1 %) экономики стран Восточной Европы. Однако при условии дальнейшей стабилизации цен на энергоносители, установления цепей поставок, сдерживания миграционного потока и сокращения складских запасов продукции, накопленных в 2022–2023 гг., в среднесрочной перспективе до 2025 г. темпы роста ВВП могут составить 2,5 %.

Страны Центральной Азии имеют достаточно высокий потенциал по росту экономики на фоне относительно высоких цен на энергоносители, усиления торговых связей с Россией по целому ряду товарных позиций. В среднесрочной перспективе темпы роста ВВП стран Центральной Азии будут не ниже 4 % в год.

В перспективе до 2030 г. можно прогнозировать умеренный рост российской отрасли ТЛУ. Среднегодовой темп роста составит 3,05 %, что выше прогнозных показателей ВВП страны (рис. 3). При этом, по ожиданиям участников отрасли, в долгосрочной перспективе объем роста отрасли ТЛУ в денежном выражении будет сопоставим с динамикой ВВП страны.

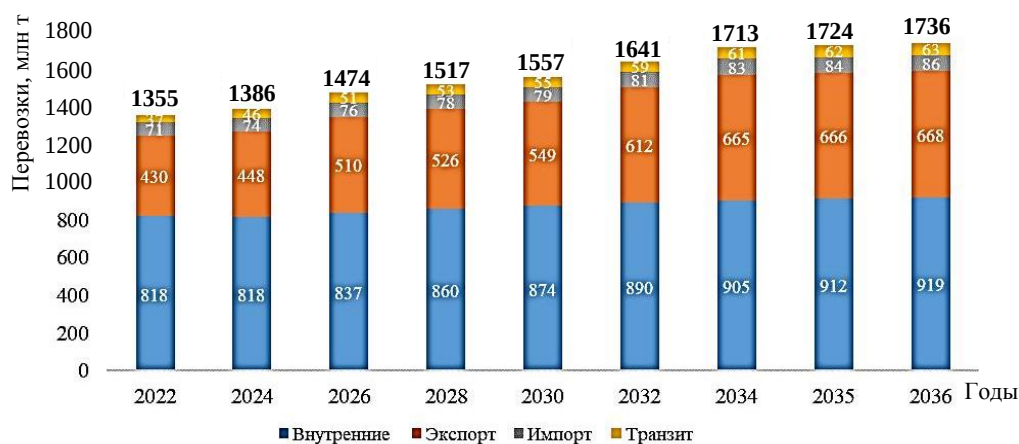


Рис. 2. Прогноз железнодорожных перевозок до 2036 г., млн т



Рис. 3. Прогноз темпов роста ВВП Российской Федерации и отрасли ТЛУ на период до 2036 г. [4]

Развитие цепей поставок в современных экономических условиях обуславливает также необходимость ускоренного развития комплексных ТЛЮ, в том числе 3PL/4PL, и электронной коммерции. В 2023 г. рынок «e-commerce» в России вырос на 38 % – до 5,7 трлн руб., что вызвано ростом онлайн-продаж крупных маркетплейсов. Также актуализировались направления работ по торговому агентированию, включение в услуги фрахтования судов, организации доставки и перевозки экспортно-импортных грузов [4–6, 13].

Вывод

В условиях современного рынка и постоянно растущего спроса на грузовые перевозки, развитие и модернизация грузовых терминалов становится ключевым фактором для обеспечения эффективности и конкурентоспособности транспортных компаний. Оценка инвестиций в этот процесс является важным этапом, который позволит определить оптимальные пути развития инфраструктуры, оборудования и тех-

нологий, а также обеспечить их соответствие современным требованиям и ожиданиям клиентов.

Совершенствование терминально-логистической инфраструктуры ОАО «РЖД» в рамках развития сети ТЛЦ является стратегическим шагом, направленным на улучшение качества предоставляемых услуг, увеличение объемов перевозок грузов и оптимизацию логистических процессов как внутри холдинга, так и при взаимодействии с внешними клиентами.

Важным аспектом развития ТЛЮ является строительство и модернизация ТЛЦ. Расширение сети объектов транспортно-логистической инфраструктуры позволит снизить нагрузку на железнодорожную сеть и осуществлять перевалку грузов на различные виды транспорта в ключевых транспортных узлах.

Развитие сети ТЛЦ позволит привлечь дополнительный объем грузовой базы и клиентов на сеть ОАО «РЖД», сократить критический износ основных фондов зданий и машин, а также увеличить пропускную способность инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL : <http://government.ru/docs/all/64817/> (дата обращения: 01.11.2024).
2. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 г.: аналитический доклад / научный руководитель А.А. Кокошин. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).
3. Власова Н.В., Оленевич В.А. Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции ОАО «РЖД» на транспортном рынке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1(77). С. 127–135.
4. Рынок логистического аутсорсинга: итоги 2022 г., оценка 2023 г., прогноз 2026 г. // ГидМаркет «Анализ рынка 3PL логистики в России». URL : <https://ma-research.ru/research/item/395-rynok-logisticheskogo-aoutsorringa-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html> (дата обращения: 01.11.2024).
5. Федеральная служба государственной статистики. URL : <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 01.11.2024).
6. Департамент экономической конъюнктуры и стратегического развития ОАО «РЖД». URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (дата обращения: 01.11.2024).
7. Власова Н.В., Оленевич В.А. Совершенствование процессов транспортно-логистического бизнес-блока по реализации проекта предоставления комплекса услуг // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). В 2 т. Чита, 2022. С. 262–270.
8. Кривошекова В.А., Левин А.В., Власова Н.В. Перспективы дальнейшего развития отрасли грузоперевозок железнодорожным транспортом в России // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2022. С. 188–193.
9. Смагина С.А., Власова Н.В., Меньшиков А.Е. Инновационные концепции развития логистических услуг по перевозке грузов в цепи поставок // Молодая наука Сибири. 2022. № 3(17). С. 41–46.
10. Власова Н.В., Миловидов А.А., Григоренко А.Г. Перспективные транспортно-логистические проекты РФ // Культура. Наука. Образование. 2024. № 1(70). С. 105–113.
11. Упырь Р.Ю., Дудакова А.В. Размещение транспортно-логистических центров и международных транспортных коридоров с использованием системно-динамического подхода // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов (шифр – МКНТ) : сборник материалов XX Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 387–392.
12. Аброшин А.А. Основные направления создания и развития транспортно-логистических центров // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 297–301.
13. Тимофеева Г.А., Хазимуллин А.Д. Анализ стратегий по привлечению клиентов транспортно-логистических услуг холдинга «РЖД» с учетом дифференциации клиентов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(57). С. 64–72.
14. Путь к высокоэффективному сервису // Гудок. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1629234&archive=2023.03.13> (дата обращения: 01.11.2024).

REFERENCES

1. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 g. [On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030] : rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 17.06. 2008 g. № 877-r. URL : <http://government.ru/docs/all/64817/> (data obrashcheniya: 01.11.2024).
2. Stsenarii razvitiya Vostochnoj Sibiri i rossijskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoy i ekonomicheskoy dinamiki Aziatsko-Tikhoookeanskogo regiona do 2030 g. [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific region until 2030] : analiticheskij doklad / nauchnyj rukovoditel' A.A. Kokoshin. URL : <http://econom.nsc.ru/ieie/Izdan/trudi/korjubaev/doklad.pdf> (data obrashcheniya: 01.11.2024).
3. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Tsifrovizatsiya kak osnovnoye strategicheskoye napravleniye dlya dostizheniya ustojchivoj konkurentnoj pozitsii OAO «RZhD» na transportnom rynke [Digitalization as the main strategic direction for achieving a sustainable competitive position of Russian Railways JSC in the transport market] / Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie. 2023. № 1(77). S. 127–135.
4. Rynok logisticheskogo outsorsinga: itogi 2022 g., otsenka 2023 g., prognoz 2026 g. [Logistics outsourcing market: results of 2022, assessment of 2023, forecast for 2026] // GidMarket «Analiz rynka 3PL logistiki v Rossii». URL : <https://ma-research.ru/research/item/395-rynok-logisticheskogo-outsorsinga-itogi-2022-g-otsenka-2023-g-i-prognoz-do-2026-g.html> (data obrashcheniya: 01.11.2024).
5. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal State Statistics Service]. URL : <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (data obrashcheniya: 01.11.2024).
6. Departament ekonomicheskoy kon'yunktury i strategicheskogo razvitiya OAO «RZhD» [Department of Economic Conditions and Strategic Development of JSC Russian Railways]. URL : <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105554?id=203> (data obrashcheniya: 01.11.2024).
7. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie protsessov transportno-logisticheskogo biznes-bloka po realizatsii proyekta predostavleniya kompleksa uslug [Improving the processes of the transport and logistics business block for the implementation of a project to provide a range of services] // Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo : materialy VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). V 2 t. Chita, 2022. S. 262–270.
8. Krivoshchekova V.A., Levin A.V., Vlasova N.V. Perspektivy dal'neyshego razvitiya otrasli gruzoperevozok zheleznodorozhnym transportom v Rossii [Prospects for further development of the rail freight transportation industry in Russia] // Tsifrovaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya : sbornik nauchnykh statej 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kursk, 2022. S. 188–193.
9. Smagina S.A., Vlasova N.V., Menshikov A.E. Innovatsionnye kontseptsii razvitiya logisticheskikh uslug po perevozke gruzov v tsepi postavok [Innovative concepts for the development of logistics services for the transportation of goods in the supply chain] // Molodaya nauka Sibiri. 2022. № 3(17). S. 41–46.
10. Vlasova N.V., Milovidov A.A., Grigorenko A.G. Perspektivnye transportno-logisticheskiye projekty RF [Promising transport and logistics projects of the Russian Federation] // Kul'tura. Nauka. Obrazovaniye. 2024. № 1(70). S. 105–113.
11. Upr R.Yu., Dudakova A.V. Razmeshchenie transportno-logisticheskikh tsentrov i mezhdunarodnykh transportnykh koridorov s ispol'zovaniyem sistemno-dinamicheskogo podkhoda [Placement of transport and logistics centers and international transport corridors using a system-dynamic approach] // Razvitie sovremennoj nauki i tekhnologii v usloviyakh transformatsionnykh protsessov (shifr – MKNT) : sbornik materialov XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 2024. S. 387–392.
12. Abroshin A.A. Osnovnye napravleniya sozdaniya i razvitiya transportno-logisticheskikh tsentrov [Main directions of creation and development of transport and logistics centers] // Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov – osnovopolozhnik transportnoj nauki i trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 2023. S. 297–301.
13. Timofeeva G.A., Khazimullin A.D. Analiz strategij po privlecheniyu klientov transportno-logisticheskikh uslug kholdinga «RZhD» s uchetom differentsiatsii klientov [Analysis of strategies for attracting clients for transport and logistics services of the Russian Railways holding company, taking into account client differentiation] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2023. № 1(57). S. 64–72.
14. Put' k vysokoeffektivnomu servisu [The way to highly efficient service] // Gudok. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1629234&archive=2023.03.13> (data obrashcheniya: 01.11.2024).

Информация об авторах

Н.В. Власова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»;
В.С. Брытков – аспирант 2-го курса факультета «Управление на транспорте и информационные технологии», специальность «Управление процессами перевозок».

Information about the authors

N.V. Vlasova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Operational Work Management;
V.S. Brytkov – 2nd year Graduate Student of the Faculty of Transport Management and Information Technologies, specialty «Transportation Process Management».

Статья поступила в редакцию 08.11.2024; одобрена после рецензирования 31.01.2025; принята к публикации 31.01.2025.
The article was submitted: 08.11.2024; approved after reviewing: 31.01.2025; accepted for publication: 31.01.2025.

Научная статья
УДК 629.423
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-28-32

КОНТРОЛЬ БДИТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ ЗА СЧЕТ КОНТРОЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА

Волчек Татьяна Витальевна¹, Томилов Вячеслав Станиславович²,
Курманова Лейла Салимовна³, Волчек Роман Витальевич⁴

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

¹ tanya.vol4eck@yandex.ru

² slavatomilov22@gmail.com

³ Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, leyla_kurmanova@mail.ru

⁴ Институт нефти и газа Сибирского федерального университета, Красноярск, romavolchek2004@gmail.com

Аннотация. От качества работы машиниста локомотива напрямую зависит эффективность перевозок. В связи с тем, что в пути следования на локомотивную бригаду воздействует большое количество негативных факторов, на железнодорожном транспорте применяются устройства безопасности, обеспечивающие контроль за бдительностью машиниста. Рассмотрены существующие устройства контроля бдительности машиниста локомотива и представлены их недостатки. Разработана новая система диагностики здоровья и контроля бдительности машинистов на основе электронных датчиков. Анализ существующих способов определения бдительности человека выявил, что наиболее точно уровень бодрствования можно определить по физиологическому параметру – пульсу человека. Алгоритм работы блока управления разработанной системы определяет потерю бдительности сразу по двум параметрам: пульсу и отсутствию движения рукой определенное время. Разработан лабораторный образец предлагаемой системы, проведены его испытания, подтвердившие работоспособность предлагаемого устройства.

Ключевые слова: бдительность, машинист, физиологические параметры, локомотив

Original article

MONITORING THE VIGILANCE OF DRIVERS DURING THE OPERATION OF LOCOMOTIVES BY MONITORING HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS

Volchek Tatyana V.¹, Tomilov Vyacheslav S.², Kurmanova Leila S.³, Volchek Roman V.⁴

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

¹ tanya.vol4eck@yandex.ru

² slavatomilov22@gmail.com

³ Volga State Transport University, Samara, leyla_kurmanova@mail.ru

⁴ Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, romavolchek2004@gmail.com

Abstract. The efficiency of transportation directly depends on the quality of the locomotive driver's work. Due to the fact that a huge number of negative factors affect the locomotive crew en route, safety devices are used in railway transport to ensure control over the driver's vigilance. The article examines the existing devices for monitoring the vigilance of a locomotive driver and identifies their shortcomings. A new system of health diagnostics and vigilance control for machinists based on electronic sensors has been developed. Analyzing the existing methods of determining a person's alertness, it was revealed that the most accurate way to determine the level of wakefulness is by the physiological parameter – the human pulse. The algorithm of the control unit of the developed system determines the loss of vigilance by two parameters at once: the pulse and the absence of hand movement for a certain time. A laboratory sample of the proposed system has been developed and tested, which confirmed the working capacity of the proposed device.

Keywords: vigilance, driver, physiological parameters, locomotive

Эффективность перевозочного процесса на железной дороге напрямую связана с качеством работы машинистов локомотива, которые сталкиваются с различными негативными факторами, такими как шум и вибрация в пути следования, монотонность работы, ненормированный график труда. После катастрофы, случившейся в 1986 г. на станции Користовка Одесской дороги, когда по причине засыпания

помощника машиниста, которому машинист передал управление локомотивом, два электровоза ЧС4 столкнулись с пассажирскими поездами, было принято решение применять устройство контроля бдительности машиниста (УКБМ) [1, 2].

Данный прибор выполнен на основе устройства бдительности, разработанного машинистом-радиолобителем Ремой Лобовкиным. Контроль бодрст-

ования проверялся за счет реагирования на световой сигнал, срабатывающий через определённые промежутки времени. Интервалы между проверками были следующими: при желтом, желто-красном, красном и одновременно горящем белом световом сигнале локомотивного светофора – 20–30 с, при белом огне – 70–90 с, при зеленом – 90–120 с. Свою бдительность машинист подтверждал с помощью нажатия на рукоятку бдительности. В случае неподтверждения происходило экстренное торможение. Недостаток данного устройства: чрезмерные проверки бдительности машиниста отвлекали его от прямых обязанностей, что оказывало на него психологическое давление и повышало нервно-эмоциональное напряжение.

На маневровых тепловозах при управлении в одно лицо более 25 лет применялась система Р117Ин, или, как ее еще называют, «педаль мёртвого машиниста». Принцип действия данной системы заключался в следующем: машинисту во время эксплуатации локомотива необходимо постоянно давить на педаль, установленную в кабине управления и удерживать ее в зажатом положении. При проверке работоспособности в кабине издавался звуковой сигнал, после которого нужно было на несколько секунд отпустить педаль, а затем зажать ее снова. Недостатки данного устройства:

- необходимость в течение долгого времени оставаться в одном положении, что вызывало дополнительную нагрузку на машиниста;
- вероятность необоснованного срабатывания автостопного торможения из-за несовершенства конструкции.

В связи с имеющимися недостатками применяемых систем контроля бдительности машинистов в 1994 г. компанией ЗАО «Нейроком» разработана телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ), которая эксплуатируется по настоящее время. Работа данной системы основана на измерении кожно-гальванической реакции (КГР) человека за счет носимой части, надетой на запястье руки [3]. КГР – это параметр, позволяющий обнаружить внезапное кратковременное повышение проводимости кожи с последующим возвращением к исходному уровню. Импульсы КГР имеют треугольную форму, включая крутой передний фронт треугольника t_1 и пологий задний t_2 . Когда человек начинает засыпать или терять бдительность, происходит увеличение интервала $T_{КГР}$ между импульсами КГР (рис. 1).

Согласно проведенному исследованию [4] и опросу машинистов о качестве работы ТСКБМ выявлено, что данная система имеет множество недостатков. Одним из основных является то, что физиологические показатели у каждого человека индивидуальны, поэтому определение потери бдительности по одному показателю вызывает значительное количество ложных срабатываний в пути следования и оказывает психологическое давление на машинистов [4–6].

Также за 2023 г. Красноярской дирекцией по ремонту тягового подвижного состава (ТПС) выявлено значительное количество отказов ТСКБМ как по вине самой дирекции (40 % всех отказов), так и при эксплуатации по вине локомотивного комплекса (60 % всех отказов) (рис. 2). Причины выхода из строя ТСКБМ: нарушение проверки бдительности, кратковременное отключение или несвоевременное включение устройства безопасности.

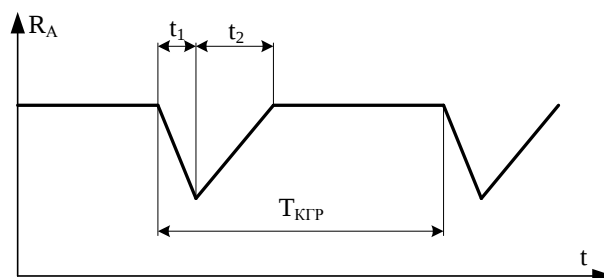


Рис. 1. Изображение импульса КГР

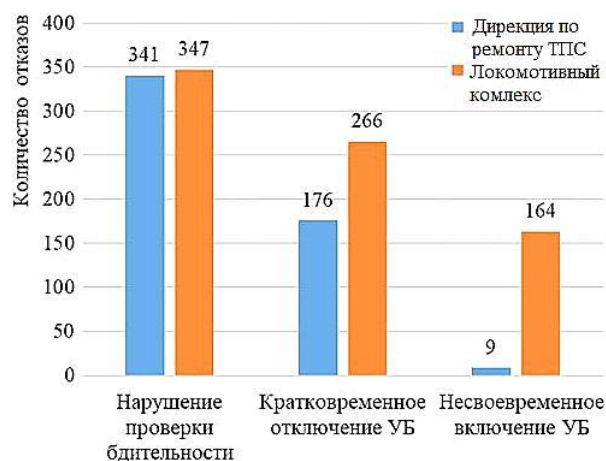


Рис. 2. Диаграмма отказов системы ТСКБМ за 2023 г.

В настоящее время благодаря развитию электронных и цифровых компонентов появилось множество параметров, по которым возможно определить уровень бодрствования человека, и некоторые технологии успешно применяются на автомобильном транспорте.

Уровень бодрствования человека, кроме как за счет измерения кожно-гальванической реакции кожи, возможно определить:

- путём измерения пульса;
- наблюдения за открытыми глазами, веками и морганием [5];
- наблюдения за динамикой движения человека [7, 8].

Известно, что при наступлении дремоты у человека наблюдается устойчивое снижение частоты сердечных сокращений. На рис. 3 представлен график пульса, который зафиксирован человеком с помощью смарт-часов. В 0:00 часов человек за-

снул, его пульс стал равномерным и снизился в среднем до 60 уд/мин, в 10:00 – пробудился, пульс участился и стал нестабильным. Данный график доказывает, что одним из параметров контроля бдительности может служить пульс.

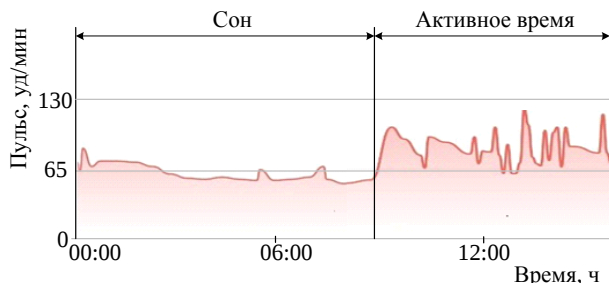


Рис. 3. График пульса человека

После анализа все существующих способов определения бодрствования человека и выявления их достоинств и недостатков, была разработана система диагностики здоровья и контроля бдительности машинистов на основе определения двух параметров: частоты сердечного ритма (ЧСР) и движения рукой. Предлагаемая система диагностики здоровья и контроля бдительности машиниста представлена функциональной схемой (рис. 4).

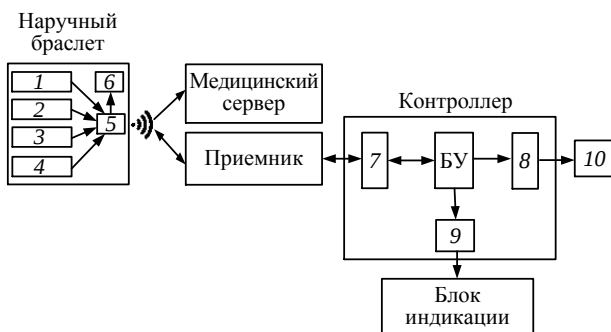


Рис. 4. Функциональная схема работы предлагаемой системы

Предлагаемая система включает в себя наручный браслет, оснащенный гироскопом 1, акселерометром 2, пульсометром 3, датчиком температуры 4 и передатчиком 5, передающим данные о пульсе и температуре тела на медицинский сервер предрейсового осмотра локомотивных бригад и приемник, установленный в кабине машиниста, а также вибродатчиком 6, воздействующим на машиниста при потере бдительности. Приемник системы принимает радиосигналы с наручного браслета и передает их на блок управления (БУ) контроллера через интерфейс 7 для обработки сигналов и определения уровня бодрствования. При обнаружении БУ условия потери бдительности машиниста подается сигнал на блок 8, преобразующий цифровой сигнал в напряжение, необходимое для управления тормозами локомотива за счет его подключения к необходимым цепям управления

локомотива с помощью выходных клемм 10. Кроме того, БУ через интерфейс 9 передает сигналы на индикаторную панель, которая при потере бдительности машиниста активирует световые индикаторы на панели управления локомотивом и издает звуковой сигнал в кабине.

Алгоритм работы блока управления предлагаемой системы представлен на рис. 5. Таким образом, условие бодрствования следующее:

- уровень бодрствования равен 100 %, если $ЧСР_1 - ЧСР_2 < 15$ уд/мин и $Dt \times N > 0$, где $ЧСР_1$ – частота сердечного ритма в настоящее время; $ЧСР_2$ – частота сердечного ритма 5 мин назад; Dt – временной интервал, равный 30 с; N – количество движений рукой;
- уровень бодрствования равен 0 %, если $ЧСР_1 - ЧСР_2 \geq 15$ уд/мин и $Dt \times N = 0$.



Рис. 5. Алгоритм работы системы контроля бдительности машиниста

Для подтверждения предлагаемого технического решения разработан и испытан в лабораторных условиях лабораторный образец данной системы (имитированы условия потери бдительности за счет физической активности и резкого ее прекращения). На рис. 6, а представлена вышеописанная лабораторная система диагностики здоровья и контроля бдительности машинистов: когда человек бодр – световой сигнал не появляется. Если в течение 30 с отсутствует движение рукой, и наблюдается резкое снижение частоты сердечного ритма, с блока управления на световую индикацию подается управляющий сигнал (рис. 6, б). Тот же самый управляющий сигнал планируется подавать для управления тормозами транспортного средства.

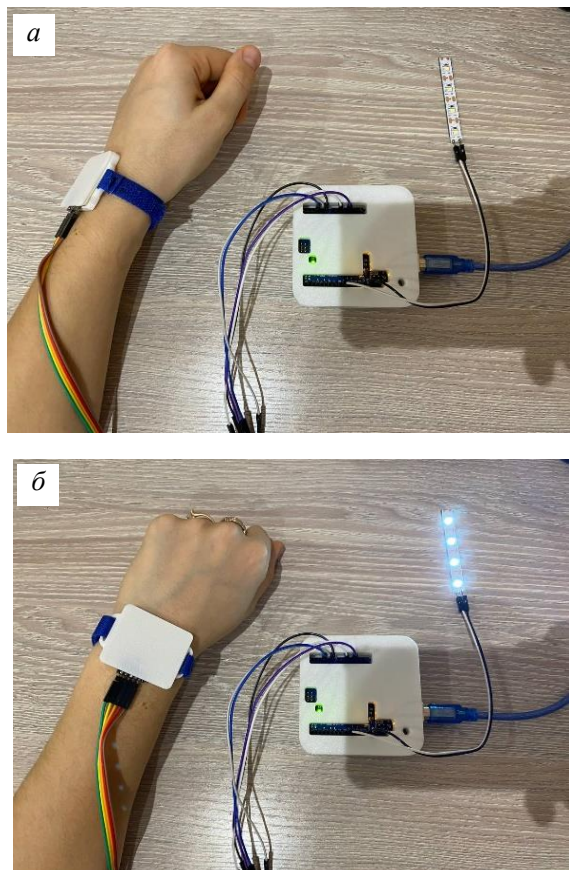


Рис. 6. Лабораторная система контроля бдительности машиниста: а – условие бодрствования выполняется; б – потеря бдительности

За счет того, что уровень бодрствования определяется сразу по двум параметрам, предлагаемая система позволит снизить психологическое давление на машинистов, так как ложные срабатывания существующей системы контроля бдительности ТСКБМ исключаются.

Так как измеренные физиологические параметры (пульс и температура тела) с носимой части будут передаваться на медицинский сервер пункта предрейсового осмотра машинистов, то, возможно, сократится время на осмотр локомотивных бригад перед поездкой, а также появится возможность выявить сердечно-сосудистые заболевания машинистов на ранних стадиях за счет регулярного мониторинга пульса.

Выводы

1. Проведен анализ устройств контроля бдительности машиниста, выявлены их недостатки.
2. Разработана система диагностики здоровья и контроля бдительности машиниста на основе электронных датчиков, измеряющих физиологические показатели человека.
3. Определены условия потери бдительности машиниста, на основании которых разработан алгоритм работы блока управления предлагаемой системы.
4. Разработан экспериментальный лабораторный образец предлагаемой системы диагностики здоровья и контроля бдительности машиниста, подтвердивший работоспособность данного технического решения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жму педаль, следовательно, – существую! // Гудок. URL : <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1377211> (дата обращения: 13.02.25).
2. Андрончев И.К., Попов Д.А., Бучин Р.А. Анализ адаптированности широко распространенных и новых локомотивных приборов безопасности (АЛСН, УКБМ, л-116, л-116у, ТСКБМ, МАЛС, СПОМ) к маневровой работе на железнодорожных путях общего и необщего пользования // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 4(52). С. 18–21.
3. Телемеханическая система контроля бодрствования машиниста / А.С. Бугаев, С.В. Герус, В.В. Дементенко [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 21–41.
4. Волчек Т.В., Волчек Р.В. Разработка системы диагностики здоровья и контроля бдительности машиниста локомотива // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4(88). С. 209–216.
5. Чуйко А.Д., Ларченко А.В. Совершенствование системы ТСКБМ для электровазов переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 240–242.
6. Результаты проверки телемеханической системы контроля бодрствования машиниста / В.В. Сериков, А.А. Закревская, Д.В. Захарченко [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 1. С. 22–26.
7. Рейн А.Р., Басков В.Н. Анализ показателей, характеризующих состояние водителя // Концепт. 2015. Т. 35. С. 176–180. URL : <http://e-koncept.ru/2015/95591.htm> (дата обращения: 15.12.2024).
8. Алпатов А.В., Кирюхин А.В. Система поддержки водителя на основе анализа пульса и параметров движения транспортного средства // Медицинская техника. 2015. № 2(290). С. 29–34.

REFERENCES

1. Zhmu peal', sledovatel'no, – sushchestvuyu! [I press the pedal, therefore, I exist!] // Gudok. URL : <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1377211> (data obrashcheniya: 13.02.25).
2. Andronchev I.K., Popov D.A., Buchin R.A. Analiz adaptirovannosti shiroko rasprostranennykh i novykh lokomotivnykh priborov bezopasnosti (ALSN, UKBM, l-116, l-116u, TSKBM, MALS, SPOM) k manevrovoj rabote na zheleznodorozhnykh putyakh obshchego i neobshchego pol'zovaniya [Analysis of the adaptability of widespread and new locomotive safety devices

MONITORING THE VIGILANCE OF DRIVERS DURING THE OPERATION OF LOCOMOTIVES BY MONITORING HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS

(ALSN, UKBM, I-116, I-116u, TSKBM, MALS, SPOM) to shunting work on public and non-public railway tracks] // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2015. № 4(52). S. 18–21.

3. Telemekhanicheskaya sistema kontrolya bodrstvovaniya machinista [Telemechanical system for monitoring the driver's wakefulness] / A.S. Bugaev, S.V. Gerus, V.V. Dementienko [et al.] // Bulletin Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD». 2017. № 2. S. 21–41.

4. Volchek T.V., Volchek R.V. Razrabotka sistemy diagnostiki zdorov'ya i kontrolya bditel'nosti mashinista lokomotiva [Development of a system for diagnosing the health and monitoring the vigilance of a locomotive driver] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. 2022. № 4(88). S. 209–216.

5. Chuiko A.D., Larchenko A.V. Sovershenstvovaniye sistemy TSKBM dlya elektrovoza peremennogo toka [Improvement of the TSKBM system for AC electric locomotives] // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2019. T. 2. S. 240–242.

6. Rezul'taty proverki telemekhanicheskoy sistemy kontrolya bodrstvovaniya machinista [Results of checking the telemechanical system for monitoring the driver's wakefulness] / V.V. Serikov, A.A. Zakrevskaya, D.V. Zakharchenko [et al.] // Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 2015. № 1. S. 22–26.

7. Rein A.R., Baskov V.N. Analiz pokazatelej, kharakterizuyushchikh sostoyanie voditelya [Analysis of indicators characterizing the driver's condition] // Kontsept. 2015. T. 35. S. 176–180. URL : <http://e-koncept.ru/2015/95591.htm> (data obrashcheniya: 15.12.2024).

8. Alpatov A.V., Kiryukhin A.V. Sistema podderzhki voditelya na osnove analiza pul'sa i parametrov dvizheniya transportnogo sredstva [Driver support system based on pulse analysis and vehicle movement parameters] // Meditsinskaya tekhnika. 2015. № 2(290). S. 29–34.

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»;
Л.С. Курманова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав»;
Р.В. Волчек – студент кафедры «Нефтегазовое дело».

Information about the authors

T.V. Volchek – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of the Railway Operation;
V.S. Tomilov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of the Railway Operation;
L.S. Kurmanova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of the Traction Rolling Stock;
R.V. Volchek – Student, Department of Oil and Gas Business.

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 03.03.2025.
The article was submitted: 19.02.2025; approved after reviewing: 03.03.2025; accepted for publication: 03.03.2025.

Научная статья
УДК 625.122
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-33-40

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ДОРОЖНЫХ ОТКОСОВ, ВЫЕМОК И НАСЫПЕЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Горшков Николай Иванович¹, Юань Цзинвэнь², Жданова Светлана Мирзахановна³

^{1, 2} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

³ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

Автор, ответственный за переписку: Жданова Светлана Мирзахановна, mirzahanovna@mail.ru

Аннотация. Выемки и насыпи в дорожных сооружениях являются наиболее распространенными грунтовыми сооружениями (фундаментами), на которых устраиваются сложные и дорогостоящие конструкции верхнего строения железных дорог и дорожное полотно автомобильных дорог. Процесс формирования полей напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} , происходящий в массиве грунтов при последовательном устройстве выемок и насыпей, при заданной равноценности их конструкций и значений параметров материалов, неодинаков. В теле дороги и вмещающей её геологической среды в процессе строительства образуются оползневые тела, их главные визуальные признаки на поверхности массива – горизонтальные и вертикальные трещины, крайние из которых ограничивают эти тела в основании полотна дорог и на разной высоте откосов самих сооружений.

При моделировании экскавации грунтов из выемок находилась предельная глубина выемки d_u при k_{stmin} , по этой же схеме находилась предельная высота насыпи h_u при k_{stmin} . Контуры призм оползания выделяются при выводе на экран уровней значений средней относительной объемной деформации ε . Круглоцилиндрические линии скольжения с k_{stmin} проходят вблизи границ, где объемные деформации равны нулю: $\varepsilon = 0$. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) системы выполнялись, в том числе, на основе графиков траекторий в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} .

Цель исследований: выявить особенности процессов образования оползневых тел в грунтовых массивах откосов (бортов) выемок и откосов насыпей.

Задачи исследований: выявить особенности формирования НДС и устойчивости систем «выемка–геосреда», «насыпь–геосреда», а также их производных, и смоделировать оценки их устойчивости, основанные на теории предельного состояния.

Результаты процесса моделирования экскавации грунта из выемки подтверждают появление вихрей смещений, или «кругов вращения», наблюдаемых при выводе поля вектора смещений: «между этапами экскавации» – вихри 1 и «от начального НДС» – вихри 2. Зоны предельного состояния, или зоны «пластичности (сдвига, сжатия, растяжения и их вариантов)», показываются на экране соответствующей штриховкой конечных элементов (КЭ).

Ключевые слова: дорожные сооружения, напряженно-деформированное состояние, система «сооружение–геосреда», послойное моделирование, экскавация грунта, траектории нагружения

Original article

ESTIMATION OF STABILITY OF SOIL ROAD SLOPES OF EXCAVATIONS AND EMBANKMENTS BY NUMERICAL METHODS

Gogshkov Nikolai I.¹, Yuan Jingwen², Zhdanova Svetlana M.³

^{1, 2} Pacific National University, Khabarovsk

³ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

Corresponding author: Zhdanova Svetlana Mirzahanovna, mirzahanovna@mail.ru

Abstract. Excavations and embankments in road structures are the most common soil structures (in other words, foundations), on which complex and expensive constructions of railroad track structure and roadbed of highways are built. The process of formation of stress fields σ_{ij} and relative deformations ε_{ij} occurring in the soil massif during the sequential arrangement of excavations and embankments, with a given equivalence of their structures and values of material parameters, is not identical. Landslide bodies are formed in the body of the road and its surrounding geological environment in the process of construction, the main visual signs of which on the surface of the massif are horizontal and vertical cracks, the extreme of which limit these bodies at the base of the roadbed and at different heights of the slopes of the structures themselves.

When modeling the excavation of soils from cuts, the limiting depth of the cut d_u at k_{stmin} was found and the limiting height of embankment h_u at k_{stmin} was found according to the same scheme. The contours of the landslide prisms are highlighted when the levels of the average relative volume deformation ε are displayed on the screen. Round-cylindrical slip lines with k_{stmin} are near the

boundaries where the volumetric strains are zero: $\varepsilon = 0$. The stress-strain state of the system was investigated on the basis of trajectory plots in the space of invariants of the stress tensor σ_{ij} and relative strains ε_{ij} .

The research objective was to identify the features of landslide bodies formation processes in soil massifs of slopes (sides) of excavations and embankment slopes.

The research goals were to reveal: 1) peculiarities of stress-strain state formation and stability of systems «excavation–geo-environment»; 2) «embankment–geo-environment»; 3) their derivatives; 4) to model their stability assessments based on the theory of limit state.

The results of the process of modeling of soil excavation from a cut confirmed the appearance of displacement vortices or «circles of rotation», which become visible when deriving the field of displacement vector «between the stages of excavation» (those are vortices – 1) and «from the initial stress-strain state» (those are vortices – 2). Limit state zones or zones of «plasticity (shear, compression, tension and their variants)» are shown on the screen by appropriate finite element (FE) hatching.

Keywords: road structures, stress-strain state, system «structure–geo-environment», layer-by-layer modeling, soil excavation, loading trajectories

Введение

Со времени появления первых инженерных методов оценки устойчивости грунтовых сооружений (Швеция, начало XX в.) прошло более 100 лет [1].

Развивающиеся со второй половины прошлого века численные методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) систем «сооружение–геосреда» также стали использовать в оценке устойчивости этих систем [2]. Некоторые программные средства позволяют увидеть на экране компьютера и место потенциальной линии скольжения, и тело оползающего массива грунта [3, 4]. В программных средствах применяются разработанные их авторами критериальные условия оценки устойчивости систем, в том числе, с использованием инженерных методов.

В XXI в. исследовательские задачи связаны с выяснением особенностей формирования НДС и устойчивости систем «выемка–геосреда», «насыпь–геосреда» и их производных. Первые исследования в этом направлении уже начались [5]. Инженерные методы оценки устойчивости, основанные на теории предельного состояния, не «понимают» разницы в НДС таких грунтовых сооружений, как *выемка* и *насыпь*. Между тем процесс образования оползневых тел в грунтовых массивах бортов выемок и откосов насыпей происходит неодинаково, в первом случае массив сначала разгружается, а потом нагружается, во втором – всегда нагружается [6, 7]. Результаты анализа исследований НДС систем «сооружение–геосреда» помогли выяснить, что это определяется особенностями их *конструкции* и *технологии* возведения сооружения [8–10].

Материалы и методы

Из практики послойного сооружения внешних поверхностей, ограничивающих массив грунта и сооружение, известно, что они испытывают движения разного знака [5]. В системе «выемка–геосреда» грунты поверхности основания выемки вблизи подошвы откоса (борта) смещаются вверх, а грунты поверхности, ограничивающие откосы (борта), в конечном итоге смещаются вниз. В системе «насыпь–основание» грунты поверхности, ограничивающие насыпь, всегда смещаются вниз, а величина и направление смещения грунтов поверхности основания зависит от значений

параметров деформируемости слагающего его грунта. Таким образом, НДС систем «сооружение–геосреда» определяется особенностями их *конструкции* и *технологии* возведения сооружения.

Ведомость подсчета профильного объема земляного полотна по главному железнодорожному пути восточного участка Байкало-Амурской магистрали представлена в отчете о НИР [6, табл. 4.10]: земляные работы на массиве по насыпям объемом 13 959,9 тыс. м³ и по выемкам объемом 1157,6 тыс. м³.

Еще одна особенность НДС приведена в недавней статье В.Г. Федоровского и С.Г. Ильина [8] как пример малоизученного явления, связанного с *вращением* грунта вокруг какой-либо точки сооружения. Как указывают авторы, данный феномен – «круг вращения», или вихрь, впервые зафиксировал в своих опытах с ограждениями проф. Ю.И. Соловьев (1956). Авторы настоящей статьи смоделировали полученный опыт в решении, выполненном численно на основе программы PLAXIS 2D. Результаты расчетов представили как поле вектора смещений, где виден «круг вращения», или вихрь. Причины и место возникновения вихрей вектора смещений в массивах грунтов с выемками, явления, которые они отражают, и их возможное, влияние на НДС системы «выемка–геосреда» также является здесь предметом начала изучения.

Таким образом, результаты процесса моделирования экскавации грунта из выемки подтверждают появление вихрей смещений, или «кругов вращения», наблюдаемых при выводе поля вектора смещений: «между этапами экскавации» – вихри 1 и «от начального НДС» – вихри 2 (рис. 1). При выводе «абсолютного» поля вектора смещений вихри по определению не видны.

Результаты и обсуждение

Для демонстрации возможностей программы GenIDE32 на рис. 2 и 3 представлены результаты исследования НДС и устойчивости бортов выемок с разной глубиной заложения ($d_0 = 44,0$ м, 1:м = 1:2), ($d_0 = 15,4$ м, 1:м = 1:1) и ($d_0 = 9,9$ м, 1:м = 1:0,5). Выемки имели неравные геометрические размеры и одинаковые значения параметров деформируемости и прочности грунтов.

При моделировании экскавации грунтов находилась предельная глубина выемки d_u при k_{stmin} . Контуры призм оползания хорошо проявляют себя при выводе на экран компьютера уровней значений средней относительной объемной деформации ε (рис. 3).

Вывод на экран расчетной схемы в двух цветах этой величины ($\varepsilon \leq 0$ – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$ – зеленая или более светлая окраска) фиксирует контуры оползневого тела (цирка) (рис. 3). Логично, что линии скольжения с k_{stmin} проходят вблизи границ, где объемные деформации равны нулю $\varepsilon = 0$. На этом же рисунке также видны места образования вертикальных трещин: чем больше заложение борта, тем больше глубина таких трещин.

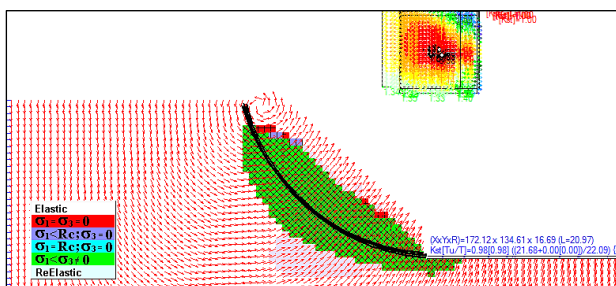


Рис. 1. Квазивихревое сложение глыбового крупнообломочного грунта вблизи поверхности глубокой выемки и трещины (116-й км ОАО «АК ЖДЯ») и результат послойного моделирования экскавации системы «выемка–геосреда» в виде поля вектора смещений u ; с квазивихрем 1 у бровки выемки и трещиной ниже его: $1:m = 1:1$, $k_{stmin} = 0,98$, $d = 13,20$ м

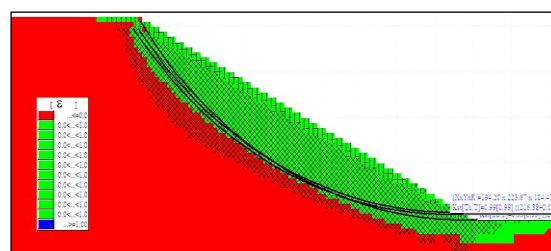


Рис. 2. Фото морщинистого склона [18, рис. 11] и результаты послойного моделирования экскавации системы «выемка–геосреда» с трещинами на поверхности откосов (бортов): $1:m = 1:2$, $k_{st} = 0,99$, $d = 44,00$ м

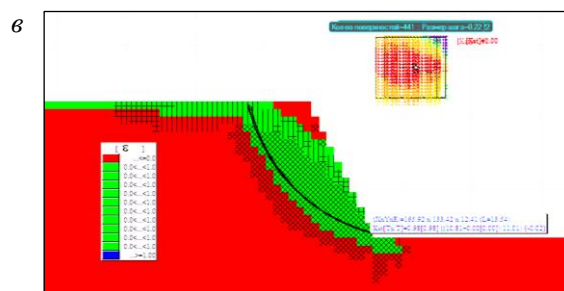
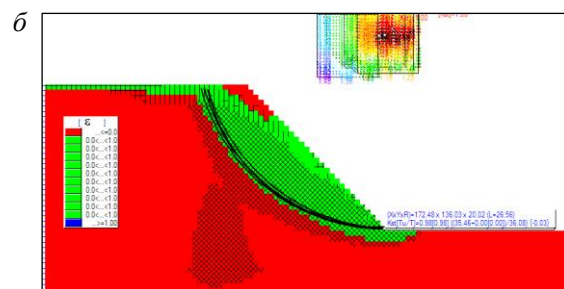
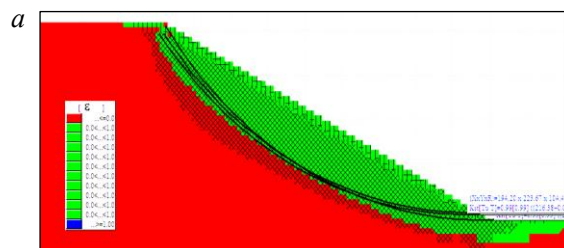


Рис. 3. Результаты расчета: зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε : $\varepsilon \leq 0$ – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$ – зеленая или более светлая окраска; а – $1:m = 1:2$, $k_{st} = 0,99$; б – $1:m = 1:1$, $k_{st} = 0,98$; в – $1:m = 1:0,5$, $k_{st} = 0,98$

Для конечного элемента, расположенного в подошве откоса выемки (насыпи) и на линии скольжения с k_{stmin} , графики траекторий имеют вид, показанный на рис. 4. В выемке, до этапа № 7 экскавации включительно, грунт данного места испытывает разгрузку как по девиатору σ_i , кПа, так и по шаровому инварианту σ , кПа, тензора напряжений, (см. графики $\sigma_i - \sigma$). При дальнейшей экскавации, после этого этапа, грунт нагружается по девиатору σ_i и продолжает разгружаться по шаровому инварианту σ , а на последних этапах снова разгружается по σ_i и σ . Можно отметить, что моделировать выемки с разными значениями E лучше с модулем упругости, так как наблюдается разгрузка, траектории в пространстве величин $\sigma_i - \sigma$ практически не меняются.

Исследование вопросов устойчивости рассматриваемых сооружений выполнялось на сертифицированной программе GenIDE32 [9] метода конечных элементов (МКЭ). Изменение НДС элементов системы «сооружение – геосреда» анализировалось в мониторинговых конечных элементах и узлах, расположенных на линии скольжения с k_{stmin} , проходящей через подошвы откосов выемки и откосов насыпи (рис. 4). В расчетах НДС использовалась нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону–Мору. Согласно действующим нормативным документам, проектирование, строительство и эксплуатацию транспортных грунтовых сооружений выполняют по условиям предельных состояний, в том числе по устойчивости (I предельное состояние):

$$k_{st} \geq [k_{st}], \quad (1)$$

где k_{st} и $[k_{st}]$ – расчетное (по А. Бишопу, К. Терцаги, Н.Н. Маслову, Г.М. Шахуняццу и др.) и нормированное (допускаемое) значение коэффициента запаса устойчивости.

В процессе расчета, после появления в бортах (откосах) зон «пластичности» или зон предельного состояния, выполнялась оценка их устойчивости. В GenIDE32 заложено семь методов оценки устойчивости [9].

Анализ НДС системы выполнялся на основе графиков траекторий в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ϵ_{ij} , как это было рекомендовано сначала в литературе [10], затем в [11].

На рис. 4, а авторами работы [10] приведен предполагаемый механизм разрушения горных пород в основании и бортах глубоких котлованов и выемок. $M(\sigma_i, \sigma)$ – устойчивое состояние в точке графика до образования выемки: 1 – прямая линия предельного равновесия; 2, 3, 4, 5, 6 – возможные траектории нагружения из точки $M(\sigma_i, \sigma)$ вследствие устройства выемки и полного разрушения горной породы. На рис. 4, б, в на основе решения задач для систем «сооружение – геосреда» МКЭ

по послойной экскавации грунта из выемки и послойному возведению насыпи показаны графики траекторий нагружения в КЭ подошвы откоса выемки и откоса насыпи.

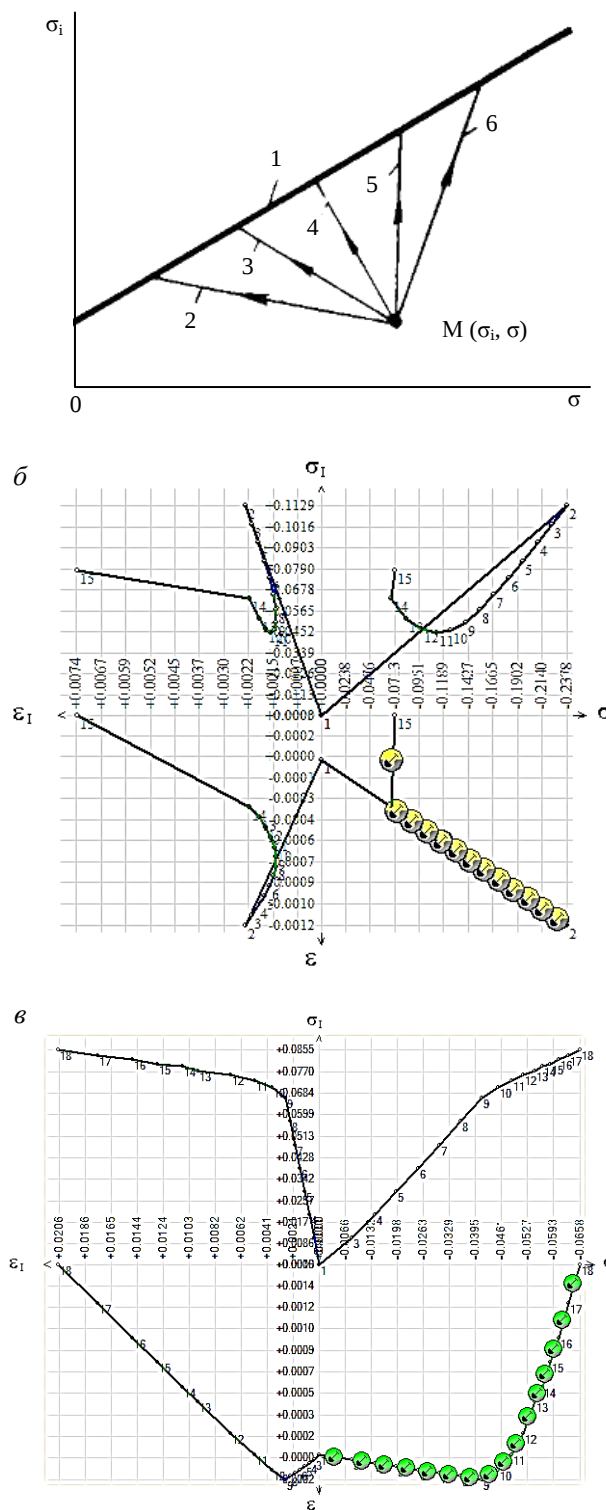


Рис. 4. Графики траекторий нагружения: а – возможные траектории нагружения 2, 3, 4, 5, 6 в точке $M(\sigma_i, \sigma)$ вследствие выемки и полного разрушения горной породы [10, рис. 3.20]; б – в подошве выемки с $k_{stmin} = 0,98$; в – в подошве насыпи с $k_{stmin} = 0,97$

Самые нагруженные КЭ расположены на выходе (в подошве) линии скольжения с k_{stmin} из грунтового массива при предельной глубине d_u (высоте h_u) борта (откоса) [12]. В каждой задаче для сравнения были приняты одинаковые заложения бортов (откосов) и равные по значениям параметры грунтов [12].

По результатам расчетов можно сделать выводы, что вид траекторий для выемок весьма далек от показанных в [13, 14], а в насыпях – весьма близок. Большие различия наблюдаются и на рисунках траекторий систем для самих выемок и насыпей. Также следует отметить разницу в значениях предельных глубин (высот) грунтовых сооружений, в выполненных решениях наблюдается условие: $d_u < h_u$.

Первые графики траекторий в пространстве $\sigma-\sigma_i$ (рис. 4, б) показывают разгрузку при экскавации грунта из выемки. При этом только на последнем этапе происходит нагружение по траектории «простого сдвига», что приводит к значительным деформациям формы – сдвигу в пространстве $\sigma_i-\varepsilon_i$ и к потере устойчивости борта (откоса) с длинной площадкой сдвига для линии скольжения с k_{stmin} . Вторые графики (рис. 4, в) показывают на нагружение по траектории «раздавливания», что также приводит к значительным деформациям сдвига в пространстве $\sigma_i-\varepsilon_i$ и в конечном итоге к потере устойчивости откоса насыпи. На всех графиках грунт по достижении поверхности нагружения 1 дилатирует, увеличивается в объеме (траектории графиков в пространстве $\sigma-\varepsilon$). Как известно [11], дилатансия характерна для принятой нелинейной модели грунта.

На каждом этапе экскавации центры вращения вихрей перемещаются к поверхности борта выемки, для этого случая – слева направо. Траектории графиков показывают на длине линии скольжения, где и когда, на каком этапе происходит нагружение или разгрузка (в пространстве $\sigma-\sigma_i$); вид графиков $\sigma_i-\varepsilon_i$ и $\sigma-\varepsilon$ указывает на особенности деформаций формоизменения и объема (рис. 4).

Выполняя оценку устойчивости грунтовых сооружений по условию, например, $k_{stmin} = 1,33 > [k_{st}] = 1,30$, по графикам на рис. 4 узнают для конкретных чисел левой и правой части условия, где находится система от условия $k_{stmin} = 1,00 \pm 0,02 \approx [k_{st}] = 1,00$, при котором образовалось тело оползня. Помимо этого, появляется возможность ответить на вопрос: какой запас устойчивости имеет система в количественном и качественном отношениях? Расчетные значения k_{stmin} для этапов моделирования выемки из примера следующие: № 7 – 1,33, № 8 – 1,22, № 9 – 1,13, № 10 – 1,06, № 11 – 1,02, № 12–14 – 0,98. Этап № 7 характеризуется началом изменения траектории «раздавли-

вания» (разгрузки) в пространстве $\sigma-\sigma_i$, выходом квазивихря 1 на поверхность борта и соответствующими размерами зон «пластичности».

На рис. 5 показан путь движения слева направо центров вращения вихрей 1 (флажки) и вихрей 2 (координаты по Y). Видно, что местоположение зарождения центров вращения вихрей 1 и 2 углубляется с уменьшением углов заложения борта.

Еще проф. К. Терцаги, основатель механики грунтов, выявил проблему образования трещин «отрыва», или «закола», в грунтовых сооружениях. Результаты решения прикладных задач показывают, что существует разница и в образовании трещин в выемках (трещин растяжения) и насыпях (трещин сдвига) (рис. 6).

Практика проектирования ответственных грунтовых сооружений основана на экспериментальных исследованиях образцов грунтов в специальных приборах, например, стабилометрах [15]. Испытания производятся согласно программам, в которых указываются траектории нагружения образцов в пространстве величин $\sigma-\sigma_i$, отражающие реальные траектории нагружения элементов сооружений. Знание возможных траекторий нагружения элементов системы «сооружение–геосреда» необходимо уже на стадии планирования экспериментов [16, 17].

Знание особенностей изменения НДС обозначенных систем укажет пути изучения более сложных природных и техногенных оползневых процессов [10].

Заключение

Современные численные методы расчета предоставляют новые возможности в исследовании особенностей НДС таких грунтовых сооружений, как выемка и насыпь, в том числе через получение информации по результатам расчетов:

1) выявлены особенности формирования НДС и устойчивости систем «выемка – геосреда», массив грунта борта выемки сначала разгружается, а потом нагружается;

2) выявлены особенности формирования НДС и устойчивости систем «насыпь – геосреда», массив грунта всегда нагружается;

3) при последовательном моделировании устройства выемки или насыпи наглядно показан процесс возникновения и развития зон «пластичности» или предельного состояния, постепенного образования оползневого тела, в том числе с вертикальными трещинами;

4) представлен процесс возникновения, развития и движения малоизученных кругов «вращения».

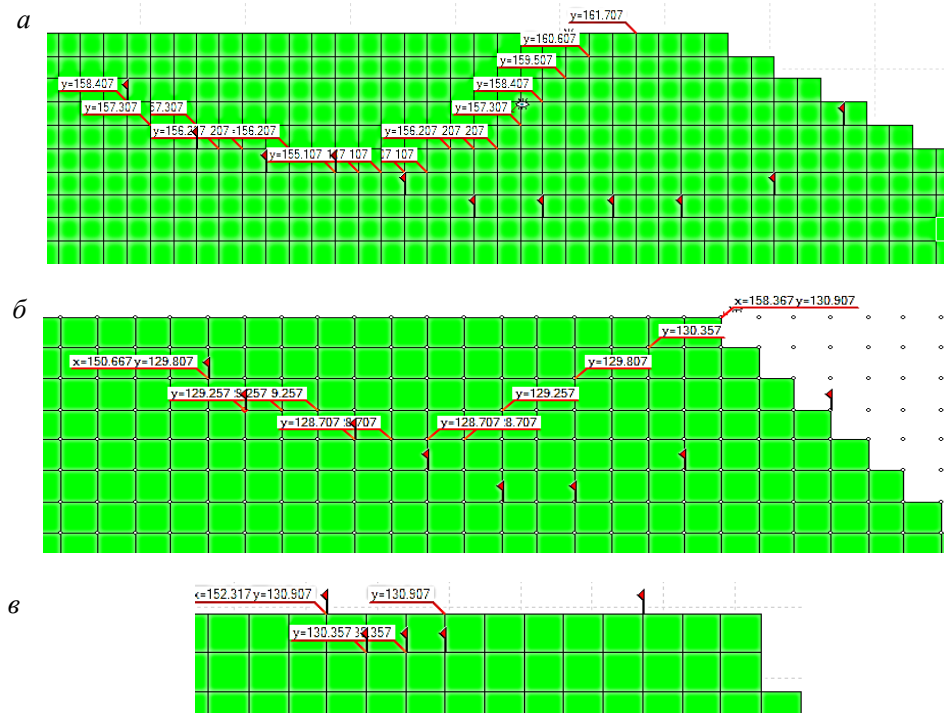


Рис. 5. Узлы с центрами вращений вихрей 1 (флажки) и вихрей 2 (координаты по Y): а – 1:m = 1:2; б – 1:m = 1:1; в – 1:m = 1:0,5

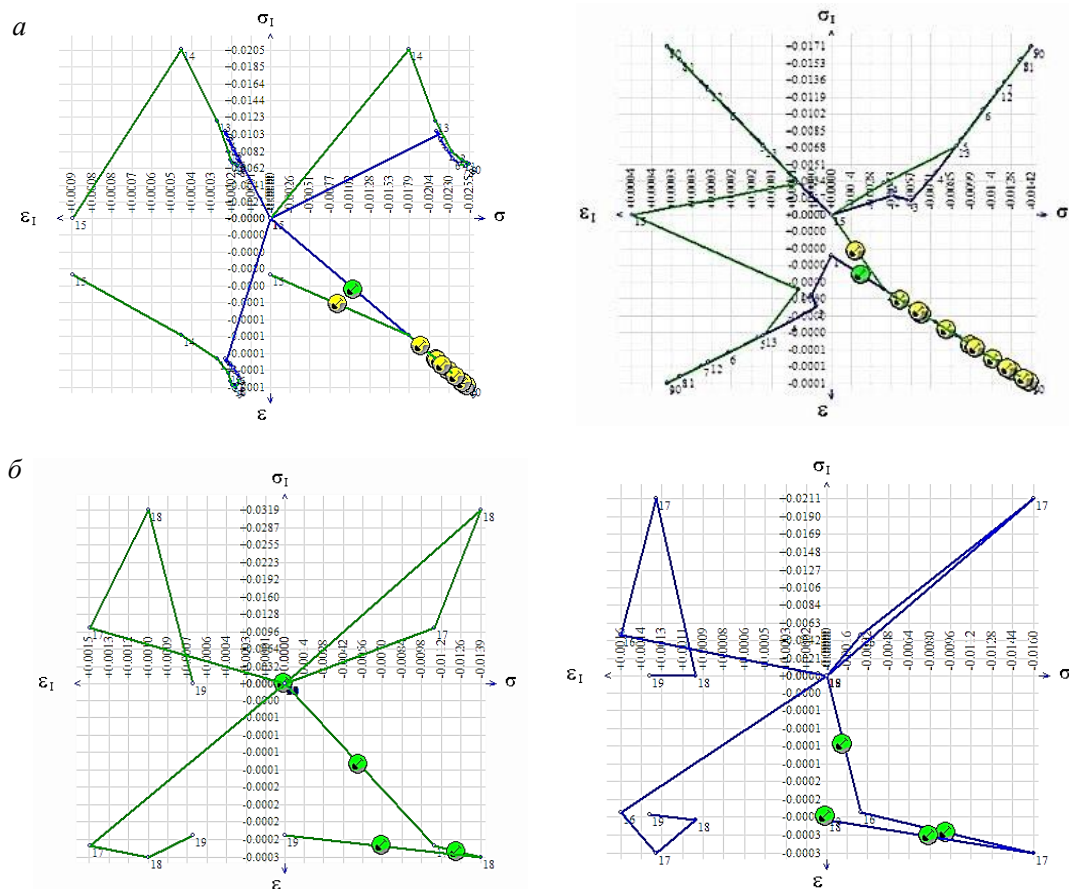


Рис. 6. Результаты расчета, графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} , МПа, и относительных деформаций ε_{ij} в КЭ устья и вершины вертикальных трещин: а – в выемке; б – в насыпи

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь : учебник для вузов железнодорожного транспорта. 3-е изд., перераб и доп. Москва : Транспорт, 1987. 479 с.
2. Фоменко И.К. Современные тенденции в учетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53.
3. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной механики. Москва : Наука, 1975. 144 с.
4. Горшков Н.И., Юань Цзинвэнь. Оценка устойчивости грунтовых склонов (откосов) методом изменения прочностных характеристик (МИПХ) в программе GenIDE32 // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. № 18. С. 48–53.
5. Горшков Н.И., Краснов М.А. Сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений (выемки и насыпи) на основе МКЭ // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5(238). С. 4–11.
6. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка–геосреда» и «насыпь–геосреда» в процессе моделирования их возведения. Ч. I / Н.И. Горшков, М.А. Краснов, Юань Цзинвэнь, С.М. Жданова // Транспортные сооружения. 2020. № 2. doi:10.15862/11SATS220
7. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «насыпь–геосреда» и «выемка–геосреда» в процессе моделирования их возведения. Ч. II / Н.И. Горшков, М.А. Краснов, Юань Цзинвэнь, С.М. Жданова // Транспортные сооружения. 2020. № 2. doi:10.15862/10SATS220
8. Федоровский В.Г., Ильин С.Г. О коэффициентах запаса // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 2. С. 2–7.
9. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613111. Расчет взаимодействия сооружений с геосредой методом конечных элементов (GenIDE32) / Горшков Н.И., Краснов М.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 апреля 2011 г. (www.femsoft.ru).
10. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. Москва : Высшая школа, 1981. 317 с.
11. Тер-Мартirosян З.Г. Прогноз механических процессов в многофазных грунтах. Москва : Недра, 1986. 166 с.
12. Zhdanova S.M., Gorchkov N.I. Problem solution of road structures at the Russian Far East northern areas // 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA-2018. Zadar, Croatia, 17–19 May 2018. Pp. 259–265.
13. Issues of vibro-dinamic impact on roadbed deformability in permafrost conditions / S.M. Zhdanova, N.I. Gorchkov, E.D. Goncharova, M.A. Krasnov // 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA-2018. Zadar, Croatia, 17–19 May 2018. Pp. 1215–1221.
14. Criterion assessment of soil transport structure stability. What does it mean? / N. Gorshkov, S. Zhdanova, M. Krasnov, Yan Czinven // Geotechnical Construction of the Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region : Of the International Geotechnical Symposium. Juzhno-Sakhalinsk. Jule 04–07. 2018. Pp. 1235–1266.
15. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при различных режимах трехосного нагружения с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 1. С. 5–10.
16. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В., Иванова О.А. Малоцикловая выносливость и деформации глинистых грунтов при трехосном циклическом нагружении // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 6–8.
17. Mirsayapov I., Aysin N. Clay soil deformation under regime long-term triaxial compression taking into account initial defects // Proceedings of STCCE. International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering. Switzerland, 2022. Pp. 99–108.
18. Трескинский С.А. Склоны и откосы в дорожном строительстве : монография. Москва : Транспорт, 1984. 157 с.

REFERENCES

1. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhny put' [Railroad track] : uchebnyk dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. 3-e izd. pererab. i dop. Moskva : Transport, 1987. 479 s.
2. Fomenko I.K. Sovremennyye tendentsii v uchetaKh ustojchivosti sklonov [Modern trends in slope stability filing] // Inzhenernaya Geologiya. 2012. № 6. S. 44–53.
3. Amusin B.Z., Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov pri reshenii zadach gornoj mekhaniki [Finite element method for solving problems of mining mechanics]. Moskva : Nauka, 1975. 144 s.
4. Gorshkov N.I., Yuan Jingwen. Otsenka ustojchivosti gruntovykh sklonov (otkosov) metodom izmeneniya prochnostnykh kharakteristik (MIPH) v programme GenIDE32 [Estimation of the stability of soil slopes by the method of changing strength characteristics (MIPH) in the program GenIDE32]. // Dal'nij Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya : mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov. Khabarovsk : Izd-vo Tikhookean gos. un-ta, 2018. № 18. S. 48–53.
5. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. Sravnitel'naya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh sooruzhenij (vyemki i nasypi) na osnove MKE [Comparative evaluation of the stress-strain state of the ground structures (excavation sand embankments) on the basis of FEM]. // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2011. № 5 (238). S. 4–11.
6. Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem «vyemka–geosreda» i «nasyp'–geosreda» v protsesse modelirovaniya ikh vozvedeniya [Features of stress-strain state of the systems –excavation–geo-environment» and «embankment–geo-environment» in the process of modeling their erection]. Ch. I / N.I. Gorshkov, M.A. Krasnov, Yuan Jingwen, S.M. Zhdanova // Transportnye sooruzheniya. 2020. № 2. doi:10.15862/11SATS220
7. Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem «nasyp'–geosreda» i «vyemka–geosreda» v protsesse modelirovaniya ikh vozvedeniya Gorshkov N.I. Krasnov M.A., Yuan C., Zhdanova S.M. [Features of stress-strain state of the systems «embankment–geo-environment» and «excavation–geo-environment» in the process of modeling their erection]. Ch. II / N.I. Gorshkov, M.A. Krasnov, Yuan Jingwen, S.M. Zhdanova // Transportnye sooruzheniya. 2020. № 2. doi :10.15862/10SATS220

8. Fedorovskiy V.G., Ilyin S.G. O koeffitsientakh zapasa [About reserve coefficients] // Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov. 2015. № 2. S. 2–7.
9. Rossiyskaya Federatsiya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №.2011613111. Raschet vzaimodeystviya sooruzhenij s geosredoj metodom konechnykh elementov (GenIDE32) [Russian Federation. Certificate of state registration of computer program №.2011613111. Calculation of interaction of structures with geo-environment by finite element method (GenIDE32)] / Gorshkov N.I., Krasnov M.A. Zaregistrirovano v reestre program dlya EVM 20 aprelya 2011. (www.femsoft.ru).
10. Tsytoich N.A., Ter-Martirosyan Z.G. Osnovy prikladnoy geomekhaniki v stroitel'stve [Fundamentals of applied geomechanics in construction]. Moskva : Vysshaya shkola, 1981. 317 s.
11. Ter-Martirosyan Z.G. Prognoz mekhanicheskikh protsessov v mnogofaznykh gruntakh [Forecast of mechanical processes in multiphase soils]. Moskva : Nedra, 1986. 166 s.
12. Zhdanova S.M., Gorshkov N.I. Problem solution of road structures at the Russian Far East northern areas // 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA-2018. Zadar, Croatia, 17-19 May 2018. Pp. 259–265.
13. Issues of vibro-dinamic impact on roadbed deformability in permafrost conditions / S.M. Zhdanova, N.I. Gorshkov, E.D. Goncharova, M.A. Krasnov // 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA-2018. Zadar, Croatia, 17-19 May 2018. Pp. 1215–1221.
14. Criterion assessment of soil transport structure stability. What does it mean? / N. Gorshkov, S. Zhdanova, M. Krasnov, Yuan Jingwen // Geotechnical Construction of the Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region : Of the International Geotechnical Symposium. Juzhno-Sakhalinsk. Jule 04-07, 2018. Pp. 1235–1266.
15. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Prochnost' i deformiruemost' glinistykh gruntov pri razlichnykh rezhimakh tryokhnogo nagruzheniya s ucheto treshchinoobrazovaniya [Strength and deformability of clayey soils under different modes of triaxial loading with account of cracking] // Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov. 2016. № 1. S. 5–10.
16. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., Ivanova O.A. Malotsiklovaya vynoslivost' i deformatsii glinistykh gruntov pri tryokhnom tsiklicheskom nagruzhenii [Malocyclic endurance and deformations of clayey soils under triaxial cyclic loading] // Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2012. № 9. S. 6–8.
17. Mirsayapov I., Aysin N. Clay soil deformations under regime long-term triaxial compression taking into account initial defects // Proceedings of STCCE. International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering. Switzerland, 2022. Pp. 99–108.
18. Treskinsky S.A. Sklony i otkosy v dorozhnom stroitel'stve [Slopes in road construction] : monografiya. Moskva : Transport, 1984. 157 s.

Информация об авторах

Н.И. Горшков – доктор технических наук, профессор Высшей школы транспортного строительства, геодезии и землеустройства;
Юань Цзинвэнь – аспирант;
С.М. Жданова – доктор технических наук, заведующий НИЛ «Основания и фундаменты», профессор кафедры «Строительство».

Information about the authors

Н.И. Горшков – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Higher School of Transport Construction, Geodesy and Land Management;
Yuan Jingwen – Post Graduate student;
S.M. Zhdanova – Doctor of Science (Engineering), Head of the Foundation Engineering Research Laboratory, Professor of the Construction Department.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 17.03.2025.
The article was submitted: 03.03.2025; approved after reviewing: 17.03.2025; accepted for publication: 17.03.2025.

Научная статья
УДК 629.4.082.3:629.423
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-41-48

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 25 КВ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Григорьев Николай Потапович¹, Копай Игорь Геннадьевич², Малышева Ольга Александровна³, Парфианович Арсений Петрович⁴, Трофимович Полина Николаевна⁵

^{1, 3, 4, 5} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

² Приморский институт железнодорожного транспорта – филиал ДВГУПС, Уссурийск, kopay@primizt.ru

¹ 0101gnp@mail.ru

³ malyshevaola@list.ru

⁴ panfianovich2323@mail.ru

⁵ ptrofimovich@bk.ru

Аннотация. Поднят вопрос взаимодействия системы тягового электроснабжения 25 кВ и электроподвижного состава. Системные задачи, сформулированные программами развития железных дорог, требуют новых решений в выполнении плановых показателей перевозочного процесса. Реализация графика движения поездов – основной показатель эффективности работы системы тягового электроснабжения и подвижного состава, определяемый соответствием напряжения на токоприемниках подвижного состава нормативному значению. Рассмотрено влияние режима вождения поездов (тяга, выбег и рекуперация) на напряжение в тяговой сети. Определены мгновенные схемы тяговых нагрузок при различных режимах вождения электроподвижного состава, для которых рассчитаны падения напряжения в узлах с учетом входных и взаимных сопротивлений. Результаты расчета напряжений в узлах контактной сети показывают, что режимы вождения поезда существенно влияют на напряжение в тяговой сети и, соответственно, на эффективность взаимодействия системы тягового электроснабжения и подвижного состава. Приведена структурная схема информационной модели повышения качества взаимодействия системы тягового электроснабжения и подвижного состава.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, контактная сеть, режимная карта, тяга, выбег, рекуперативное торможение, входные и взаимные сопротивления, нормативный и вариантный графики движения поездов

Original article

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM 25 KV AND ELECTRIC ROLLING STOCK

Grigoriev Nikolay P.¹, Kopay Igor G.², Malysheva Olga A.³, Parfianovich Arseniy P.⁴, Trofimovich Polina N.⁵

^{1, 3, 4, 5} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

² Primorsky Institute of Railway Transport – branch of the Far Eastern State Transport University, Ussuriysk, kopay@primizt.ru

¹ 0101gnp@mail.ru

³ malyshevaola@list.ru

⁴ panfianovich2323@mail.ru

⁵ ptrofimovich@bk.ru

Abstract. The article is devoted to the interaction of the 25 kV traction power supply system and electric rolling stock. The system tasks formulated by the railway development programs require new solutions in fulfilling the planned indicators of the transportation process. Fulfillment of the train schedule is the main indicator of the efficiency of the traction power supply system and rolling stock, and it is determined by the compliance of the voltage at the pantographs of the rolling stock with the standard value. The article considers the influence of the train driving mode (traction, coasting and recuperation) on the voltage in the traction network. Instantaneous traction load patterns are determined for various driving modes of electric rolling stock, for which voltage drops in nodes are calculated taking into account input and mutual resistances. The results of calculating the voltages in the contact network nodes show that the train driving modes significantly affect the voltage in the traction network and accordingly, the efficiency of interaction of the traction power supply system and rolling stock. The article presents a structural diagram of an information model for improving the quality of interaction between the traction power supply system and rolling stock.

Keywords: traction power supply system, electric rolling stock, contact network, mode map, traction, coasting, regenerative braking, input and mutual resistances, standard and variant train schedules

Стратегические программы развития железных дорог России предусматривают реализацию возрастающих объемов перевозок грузов и пассажиров. При этом необходимо разрабатывать и внедрять в практическую деятельность организацию перевозочного процесса на основе перехода от реактивного управления показателями деятельности железной дороги к моделированию прогнозных условий и реализации применения рационального расхода ресурсов в интервалах времени, обеспечивающих снижение энергоемкости перевозочного процесса, повышение эффективности взаимодействия подразделений железной дороги и безопасности движения поездов.

Выполнение системных задач, сформулированных стратегическими программами, требует новых подходов достижения плановых показателей перевозочного процесса. Современное осуществление требований к железнодорожным перевозкам базируется на информационном моделировании, предусматривающем прогнозирование исходных данных в интервалах времени для каждого подразделения, моделирование прогнозных показателей взаимодействия составных частей системы (подсистем) и выбор нормальных схем питания тяговых нагрузок в интервалах времени расчетного (как правило, суточного) периода.

Система тягового электроснабжения (СТЭ) [1] обеспечивает электроподвижной состав (ЭПС) электрической энергией, при этом соблюдение графика движения поездов зависит от соответствия напряжения на токоприемниках ЭПС нормативному значению. Встречное интервальное регулирование напряжения в тяговой сети производится ступенчато и может обеспечить поддержание графика движения поездов нормализацией схем питания тяговых нагрузок

при известных прогнозных токах в интервалах времени расчетного периода, которые рекомендованы режимными картами вождения поездов.

В процессе движения ЭПС меняют взаимное расположение относительно друг друга, местонахождение относительно тяговых подстанций, силу тока и скорость, так как каждый из них будет находиться на элементе профиля пути, оказывающем свое сопротивление движению, в зависимости от которого машинист выбирает режим ведения поезда. В свою очередь происходит изменение нагрузок тяговых подстанций, а следовательно, и уровень напряжения в электрической цепи «система внешнего электроснабжения (СВЭ) – тяговая подстанция – контактная сеть – токоприемник электроподвижного состава», подводимого далее к тяговым двигателям электровоза, а его изменение влияет на режим работы и скорость движения электроподвижного состава.

Рассматривая взаимодействие систем тягового электроснабжения и ЭПС, важно уделить внимание режимам движения поезда, которыми управляет машинист, осуществляя переключения режимов работы системы управления электроподвижным составом (рис. 1). Система управления электроподвижным составом задает режимы работы тяговых двигателей, обеспечивающих требуемые значения силы тяги F_k или тормозной силы B при заданных скоростях движения, а машинист своими действиями должен учитывать режимы работы тяговых электродвигателей U_d, I_d и I_b и СТЭ U_c , а также условия движения поезда $v, t, \frac{dv}{dt}, S, i, R$, которые рекомендованы режимной картой вождения поезда и ограничены требованиями безопасности движения v_{max} [2].

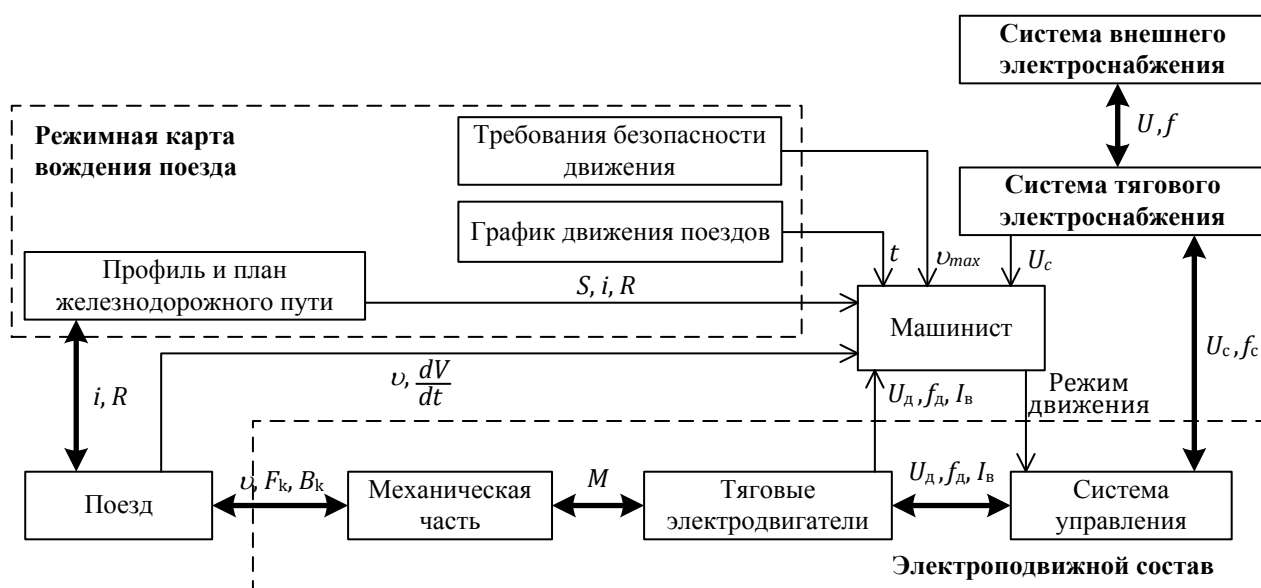


Рис. 1. Структурная схема организации движения ЭПС: $\longleftrightarrow$ – потоки энергии; $\longrightarrow$ – информационные потоки

Фактически бортовая система управления электроподвижным составом (система автоведения) решает уравнение движения поезда, причем это решение должно учитывать:

- профиль пути, т.е. сопротивление от уклона W_i ;
- график движения и режимные карты, т.е. требуемую скорость движения поезда;
- тяговые и тормозные возможности электроваза, т.е. возможность регулирования сил F_k и B ;
- ограничения, накладываемые условиями движения поезда.

Решение уравнения движения позволяет определить скорость движения, пройденный путь и время хода поезда на расчетном участке. В общем виде уравнение движения поезда можно представить следующим образом [3]:

$$\frac{dv}{dt} = \xi (f_k \pm w_k - b),$$

где $\frac{dv}{dt}$ – ускорение поезда, км/ч²; f_k – удельная сила тяги электроваза, Н/кН; w_k – удельная сила сопротивления движению поезда, Н/кН; b – удельная тормозная сила поезда, Н/кН; ξ – коэффициент уравнения, $\xi = 120 \text{ км/ч}^2 / \text{Н/кН}$.

В зависимости от сочетания действующих сил на электроподвижной состав различают три режима движения поезда:

1) режим тяги, когда тормозные силы отсутствуют, и уравнение движения принимает вид:

$$\frac{dv}{dt} = \xi (f_k \pm w_k),$$

знаки «+» соответствует равноускоренному движению; «–» – равнозамедленному движению;

2) режим холостого хода (выбега), когда тяговые и тормозные силы отсутствуют:

$$\frac{dv}{dt} = \xi (w_k),$$

тогда поезд движется за счет запасенной кинетической энергии по инерции, и тяговые двигатели отключены от контактной сети;

3) режим торможения, когда тяговые силы отсутствуют, и уравнение движения поезда принимает вид:

$$\frac{dv}{dt} = \xi (\pm w_k - b).$$

Согласно заданному алгоритму движения машинист осуществляет управление процессом движения поезда, чередуя на участке эти три режима в разной последовательности (рис. 2).

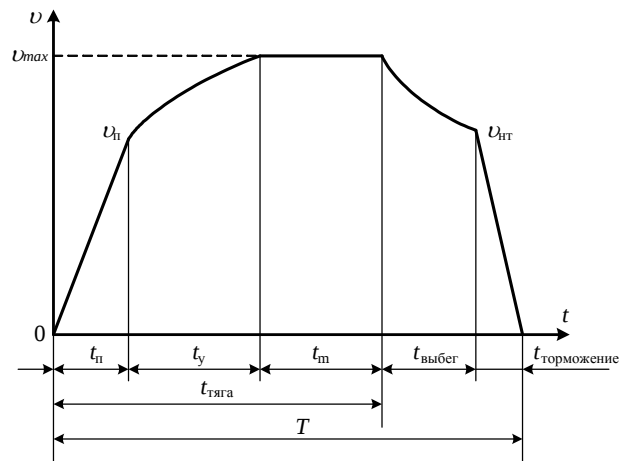


Рис. 2. Зависимость значения скорости во времени согласно режимам движения поезда

В начале движения машинист задает тяговый режим работы электродвигателей, чтобы сила тяги F_k электроваза была больше силы сопротивления движению поезда W . Скорость электроподвижного состава v за время движения T его по перегону нарастает в течение времени пуска t_n , при этом скорость v_n является скоростью выхода на номинальную тяговую характеристику электроваза, на которой он может работать длительно.

Дальнейший рост скорости движения поезда приводит к возрастанию силы сопротивления движению W , а сила тяги электроваза монотонно снижается, и через некоторое время эти силы становятся равными. Начиная с этого момента на участке неизменного профиля пути поезд будет двигаться с постоянной скоростью. За время t_y устанавливается значение скорости $v_y = v_{max}$, и после этого поезд движется со скоростью v_{max} в течение t_m .

При необходимости снижения скорости машинист переводит рукоятку главного контроллера системы управления в нулевое положение, таким образом ограничивая ток тяговых двигателей. При этом сила тяги F_k становится равной нулю, и режим движения поезда определяется соотношением силы инерции и силы сопротивления движению. Такой режим движения поезда называют выбегом, и на горизонтальном участке пути поезд будет замедляться в течение t_b под действием силы сопротивления движению W .

В течение t_t осуществляется торможение начальной скоростью $v_{нт}$. В этой ситуации увеличивается сопротивление движению поезда тормозной системой при пневматическом или колодочном торможении либо электрическом реостатном торможении, кинетическая энергия превращается в тепловую энергию и не оказывает влияния на показатели работы системы тягового электроснабжения. Рекупера-

тивное торможение производится путем перевода тяговых двигателей ЭПС в генераторный режим. При этом ток рекуперации, протекая по сопротивлениям СТЭ, оказывает влияние на падения напряжения и потери мощности и электрической энергии.

Взаимодействие систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава тесно связано с вопросом условий применения режимов вождения поездов. Электрическое торможение электроподвижного состава переменного тока с коллекторными тяговыми машинами возможно, если электрическая цепь, включающая якорь тяговой электрической машины, образует замкнутый контур с потребителем вырабатываемой электрической энергии.

Электрическое рекуперативное торможение ЭПС, при котором высвобождаемая при переводе тягового электродвигателя в генераторный режим электрическая энергия передается в контактную сеть, допустимо применять при выполнении ряда обязательных условий, в том числе и напряжение на токоприемнике рекуперирующего ЭПС [4].

Движение ЭПС в режимах тяги и рекуперация создают токи, приводящие к падению напряжения, при их протекании по сопротивлениям тяговой сети и СВЭ. Следовательно, напряжение в тяговой сети и энергоемкость перевозочного процесса зависят от выбора режимов движения поездов в интервалах пути и(или) времени движения поездов. Заметим, что рациональные режимы движения поездов в интервалах времени оказывают влияние на напряжения в узлах присоединения токоприемников ЭПС и могут обеспечивать выполнение графика движения поездов нормализацией напряжения в тяговой сети [5, 6].

Рассмотрим участок системы электроснабжения электрифицированных железных дорог 25 кВ. Электроподвижной состав получает электрическую энергию от СВЭ через тяговые подстанции 1 и 2, каждая из которых представлена в виде двух силовых трехобмоточных трехфазных трансформаторов (тяговые трансформаторы), распределительных устройств высшего (РУ ВН) и тягового напряжения (РУ 25 кВ), а также контактной сети [1], состоящей из контактной подвески и рельсовой сети. Расчетная схема участка системы электроснабжения электрифицированной железной дороги 25 кВ представлена на рис. 3.

Тяговые подстанции 1 и 2 присоединены к СВЭ и содержат распределительные устройства высшего (РУ ВН) и тягового напряжения (РУ 25 кВ). Распределительные устройства районного напряжения не показаны. Электроподвижной состав ЭПС_{*i*} ($i = 1, \dots, m$) расположен на расстоянии l_i ($i = 1, \dots, m$) соответственно от тяговой подстанции 1. Электроснабжение ЭПС (далее токи тяговых нагрузок) осуществляется силовыми трехфазными трехобмоточными тяговыми трансформаторами. На каждой тяговой подстанции включены по два тяговых трансформатора.

Рассмотрим влияние режима вождения поездов (тяги, выбег и рекуперация) на напряжение в тяговой сети (контактная сеть, рельс) в узлах 1, 2 и 3 присоединения ЭПС. Для примера примем расстояние между подстанциями 1 и 2 равным 50 км; l_1 , l_2 и l_3 соответственно 15, 23 и 42 км. Контактная сеть двухпутного участка выполнена контактной подвеской типа ПБСМ2-95-МФ-100 и рельсом Р65. Тяговые трансформаторы ТДГНЖ-40000-220/27,5/11-У1 работают параллельно.

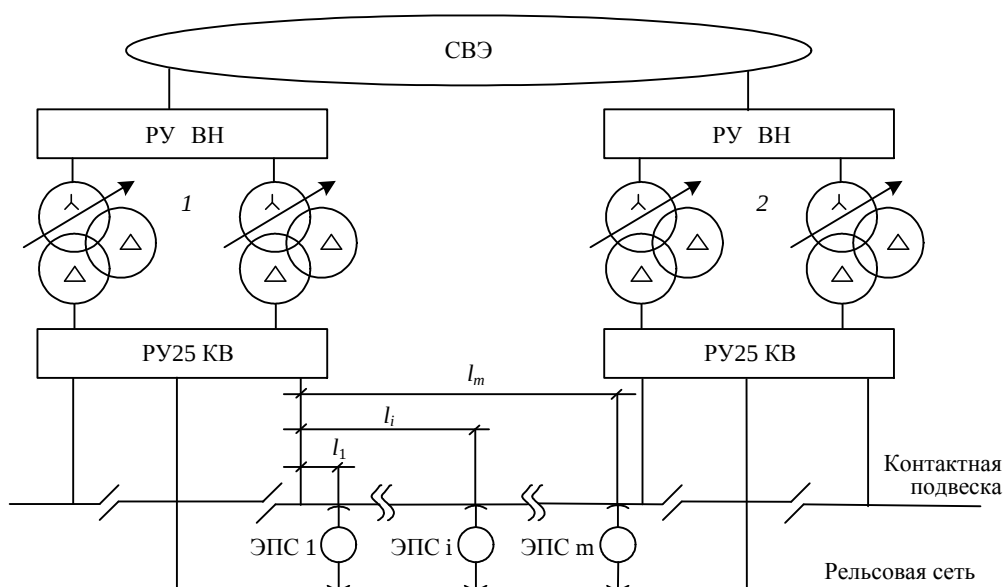


Рис. 3. Расчетная схема участка системы тягового электроснабжения

Схема замещения принятой расчетной схемы при $m = 3$ приведена на рис. 4. На примере схемы замещения рассмотрим влияние режима вождения поездов на напряжение в контактной сети.

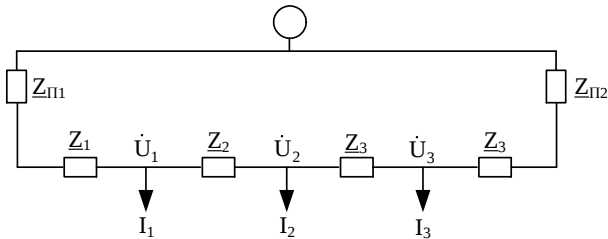


Рис. 4. Схема замещения

На схеме замещения приняты следующие обозначения: $Z_{П1}$, $Z_{П2}$ – сумма фазных сопротивлений силовых трансформаторов и входных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций 1 и 2 к ЛЭП СВЭ, приведенных к напряжению контактной сети с учетом распределения токов ЭПС по фазам тяговых трансформаторов и ЛЭП:

$$Z_{П1} = Z_{П2} = 0,1 + j2,2 \text{ Ом};$$

Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 – сопротивления участков контактной сети межподстанционной зоны;

$$Z_1 = 2,0 + j4,6 \text{ Ом}; Z_2 = 1 + j2,4 \text{ Ом}; Z_3 = 2,5 + j5,9 \text{ Ом}; Z_4 = 1 + j2,5 \text{ Ом}.$$

Определим падения напряжения в узлах $j = 1, 2, 3$ при соответствующих значениях токов I_j по формуле

$$\Delta \dot{U}_i = \sum_j \dot{I}_j Z_{ij}, i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 3,$$

где $\dot{I}_j$ – значение тока в узле j ; Z_{ij} – значение входного Z_{ii} и взаимного сопротивления $i \neq j$ узлов.

Рассмотрим мгновенные схемы тяговых нагрузок при движении поездов в режимах тяги и выбега, тяги и рекуперации (без учета токов собственных нужд):

– *первая схема*: 1-й и 3-й ЭПС в режиме тяги, реальные значения модулей токов приняты соответственно с режимными картами вождения поездов, аргумент определен экспериментально для электроваза «Ермак», 2-й ЭПС в режиме выбега и (или) пневматического торможения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_3 = 450 e^{-j31,5} \text{ А};$$

– *вторая схема*: первый и третий ЭПС – в режиме тяги, второй ЭПС – в режиме рекуперации. Значения реальных модулей токов приняты соответственно с режимными картами вождения поездов, аргумент определен экспериментально для электроваза «Ермак»:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_3 = 450 e^{-j31,5} \text{ А}; \quad \dot{I}_2 = 450 e^{-j117,5} \text{ А}.$$

Значения падений напряжения узлов в схемах рассматриваемого участка контактной сети приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения падений напряжения узлов
в схемах рассматриваемого участка

Схема	$\Delta \dot{U}_1$, кВ	$\Delta \dot{U}_2$, кВ	$\Delta \dot{U}_3$, кВ
Первая	$2,8 e^{j42}$	$2,7 e^{j43}$	$2,4 e^{j45}$
Вторая	$3,4 e^{j42}$	$3,6 e^{j3}$	$2,7 e^{j23}$

Рассчитаем напряжения на токоприемнике ЭПС в узлах $j = 1, 2, 3$ для двух схем питания тяговых нагрузок. Совместим вектор напряжения холостого хода с действительной осью, напряжение холостого хода примем равным номинальному в тяговой сети (25 кВ). Напряжения на токоприемниках ЭПС в узлах 1, 2 и 3 присоединения соответствующих ЭПС для первой и второй схем рассчитаем по формуле

$$\dot{U}_j = \dot{U}_0 - \Delta \dot{U}_j.$$

Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов

Схема	$\Delta \dot{U}_1$, кВ	$\Delta \dot{U}_2$, кВ	$\Delta \dot{U}_3$, кВ
Первая	$22,9 e^{-j5}$	$23,1 e^{-j5}$	$23,3 e^{-j4}$
Вторая	$21,7 e^{-j2}$	$21,4 e^{-j1}$	$22,5 e^{-j3}$

Результаты расчётов доказывают, что ЭПС в режиме рекуперативного торможения в системе тягового напряжения переменного тока 25 кВ снижает напряжение в тяговой сети и соответственно на токоприёмниках ЭПС, работающих в режиме тяги. Применение рекуперативного торможения при ведении поезда не повышает уровень напряжения на токоприёмнике ЭПС.

В настоящее время применяются режимные карты вождения поездов, которые отображают режим ведения поезда (тяга, рекуперация, ток), согласованный с пикетом пути и времени для нормативных графиков движения поездов. Довольно часто нормативные графики движения поездов нарушаются, и тогда движение поездов выполняется по вариантным графикам движения поездов.

Рассмотрим технологию нормализации режимных карт вождения поездов при вариантных графиках движения поездов. Структурная схема информационной модели рационального взаимодействия СТЭ и ЭПС приведена на рис. 5 [7].

Направления потоков информационной модели представлены на рис. 5, обоснование и содержание блоков приведены ниже.

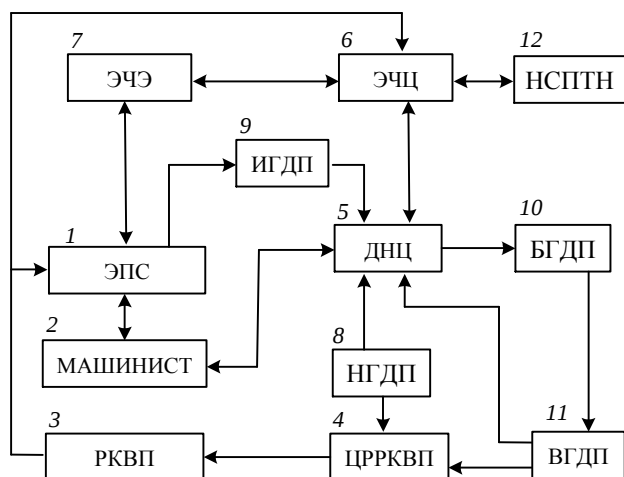


Рис. 5. Структурная схема информационной модели нормализации взаимодействия СТЭ и ЭПС

1. ЭПС – потребитель однофазной электрической энергии. Особенность потребления ЭПС – перемещение по железной дороге, что приводит к изменению доли тока ЭПС между смежными тяговыми подстанциями, соединенными с межподстанционной зоной, на которой находится ЭПС. Таким образом, токи подстанций во времени могут быть определены при известных координатах места нахождения, токе ЭПС в каждый момент времени.

2. МАШИНИСТ (машинист или система автоведения) – ЭПС управляет скоростью движения поезда путём изменения тока в целях выполнения графика движения поезда благодаря обеспечению скорости движения поезда. При этом режимы движения поезда тяга, выбег и торможение изменяют мощность (ток) потребления электрической энергии во времени.

3. Режимная карта вождения поезда (РКВП) – это графический документ с указанием пикетов пути, плана и профиля пути, тока потребления при движении и скорости движения ЭПС. Режимная карта разрабатывается на основе нормативного графика движения поезда с учетом общепринятых документов и передается машинисту твердой копией и (или кассетой автоведения) перед поездкой в целях обеспечения безопасного движения поезда, выполнения нормативного графика движения, минимального потребления электрической энергии на движение поезда.

Недостаток режимной карты – отсутствие возможности определить прогнозные токи ЭПС в целях выбора нормальных схем питания тяговых нагрузок в интервалах времени по вариантному графику движения поезда.

В случае несоблюдения нормативного графика движения, например, остановки поезда в случае инцидента движения поезда, режимная карта не соответствует рациональному режиму ведения по-

езда в новых условиях. Прибытие поезда на станцию после инцидента движения поезда выполняется путем корректировки тока, скорости, ускорения движения поезда во времени. В данном случае машинист принимает решение самостоятельно, без применения режимной карты движения поезда.

4. ЦРРКВП (центр разработки режимных карт вождения поезда) – это подразделение разрабатывает режимные карты вождения поезда на основе вариантного графика движения поезда, прогнозного интервала времени, информационных технологий с учетом реальных факторов, влияющих на показатели движения поезда во времени, а также пикетов пути. Режимные карты обеспечивают безопасное движение поезда с минимальным потреблением и потерями электрической энергии движения поезда вариантного графика движения поездов.

5. ДНЦ (поездной диспетчер) – управляет движением поездов на основе нормативного графика движения поездов. В случае нарушения нормативного графика движения поезда принимает меры в организации движения поезда по вариантным графикам движения поездов таким образом, чтобы восстановить нормативный график за счет изменения скорости ЭПС машинистом, которая не предусмотрена режимной картой вождения поезда при нормативном графике движения поездов. При этом потребление электроэнергии возрастает, напряжение в тяговой сети снижается, и качество вождения ЭПС зависит от квалификации машиниста.

6. ЭЧЦ (энергодиспетчер) – осуществляет оперативное управление системой тягового электрообеспечения таким образом, чтобы обеспечить нормативное напряжение в тяговой сети для выполнения графика движения ЭПС. При этом схема питания тяговых нагрузок выбирается на перспективные интервалы времени расчетного периода с учетом минимальных потерь напряжения и рационального расхода коммутационного ресурса аппаратов и устройств.

7. ЭЧЭ (тяговая подстанция) – электроустановка, предназначенная в основном для переработки и распределения электрической энергии в целях обеспечения электрической энергией ЭПС. При этом на ЭЧЭ предусмотрены устройства интервального регулирования напряжения в тяговой сети, что обеспечивает выполнение требований по показателям напряжения в тяговой сети для соблюдения графика движения поездов. Схема питания тяговых нагрузок, принятая на интервал времени, влияет на потери электрической энергии, интенсивность термического износа изоляции обмоток силовых трансформаторов и качество электрической энергии.

8. НГДП (нормативный график движения поездов) – регламент организации движения поездов с указанием пикетов пути, интервалов попутного

следования поездов, времени хода между станциями и времени стоянок на станциях. Движение поездов строго по графику обеспечивается правильной организацией и точным выполнением технологического процесса работы станций, локомотивных и вагонных депо, тяговых подстанций, пунктов технического осмотра и других подразделений железных дорог, связанных с движением поездов.

9. ИГДП (исполненный график движения поездов) – документ исполнения регламента движения поезда с указанием пикетов пути, действительных интервалов попутного следования поездов, времени хода между станциями и времени стоянок на станциях и перегонах пути (стоянки поезда на исполненном графике и вынужденные). Вынужденные стоянки возникают при инцидентах движения и приводят к нарушению соблюдения нормативного графика движения поезда.

10. БГДП (баланс нормативного и исполненного графиков движения поезда) – определяет значение отклонения показателей нормативного и исполненного графиков движения поезда. Значение отклонения исполненного графика движения поезда от нормативного зависит, например, от не предусмотренной нормативным графиком движения поезда стоянкой, и является критерием принятия решения о переходе на вариантный график движения поезда. Вариантный график движения поезда разрабатывается на время и участок пути, достаточный для восстановления нормативного графика движения поезда, и передается машинисту поезда и поезвному диспетчеру.

11. ВГДП (вариантный график движения поезда) – регламент организации движения поездов с указанием времени, пикетов пути, интервалов попутного

следования поездов, времени хода между станциями и времени стоянок на станциях, принимаемый при инцидентах движения поездов по нормативному графику движения поездов. Движение поезда по вариантному графику на участке пути обеспечивает восстановление нормативного графика движения поездов в перспективе движения [8].

12. НСПТН (нормальная схема питания тяговых нагрузок) – принимается на прогнозный интервал времени движения поезда по участку тяговой сети. Нормальная схема питания тяговых нагрузок обеспечивает нормируемое напряжение для выполнения графика движения поездов, при минимальной энергоёмкости движения поездов, и рациональное применение ресурса устройств и аппаратов регулирования напряжения.

Выводы

1. Повышение эффективности взаимодействия системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава возможно на основе информационного моделирования схем питания тяговых нагрузок, которые соответствуют критериям нормы на прогнозные интервалы времени.

Прогнозные режимы движения поездов целесообразно выбирать с учетом влияния на показатели работы системы тягового электроснабжения и отображать на режимных картах нормативных и вариантных графиков движения поездов.

Результаты расчета напряжения в узлах контактной сети доказали, что режимы вождения поезда влияют на напряжение в тяговой сети и, соответственно, на эффективность взаимодействия СТЭ и ЭПС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 53685-2009. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2010. 24 с.
2. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом : учебник для вузов железнодорожного транспорта. Москва : Маршрут, 2005. 360 с.
3. Правила тяговых расчётов для поездной работы: [утв. распоряжением ОАО «Российские железные дороги» от 12.05.2016 г.]. Москва, 2016. 515 с.
4. Инструкция о порядке применения электрического (реостатного, рекуперативного) тормоза при следовании с поездом : [утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 21.11.2024 г. № 2883/р]. 7 с.
5. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, М.С. Клыков, А.П. Парфианович, В.И. Шестухина // Электротехника. 2016. № 2. С. 58–60.
6. Григорьев Н.П., Власенко С.А., Парфианович А.П. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. В 3 т. Т. 2 ; под ред. С.М. Гончарука. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. С. 63–69.
7. Об утверждении Инструкции о порядке планирования, разработки, предоставления и использования технологических «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ в ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 25.02.2019 г. № 348/р.

REFERENCES

1. GOST R 53685-2009. Elektrifikatsiya i elektrosnabzheniye zheleznikh dorog. Terminy i opredeleniya. [State Standard 53685-2009. Electrification and power supply of railways. Terms and definitions]. Moskva : Standartinform, 2010. 24 s.
2. Plaks A.V. Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Control systems for electric rolling stock] : Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Moskva : Marshrut, 2005. 360 s.

3. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty [Rules for traction calculations for train operation] : [utv. rasporyazheniyem OAO «Rossijskiye zheleznye dorogi» ot 12.05.2016]. Moskva, 2016. 515 s.

4. Instruksiya o poryadke primeneniya elektricheskogo (reostatnogo, rekuperativnogo) tormoza pri sledovanii s poezdom [Instructions on the procedure for using an electric (rheostatic, regenerative) brake when traveling with a train] : [utv. rasporyazheniyem OAO «RZhD» ot 21.11.2024 g. № 2883/r. 7 s.

5. Povysheniye effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka 25 kV [Improving the energy efficiency of the traction power supply system of alternating current 25 kV] / N.P. Grigoriev, M.S. Klykov, A.P. Parfianovich, V.I. Shestukhina // Elektrotehnika. 2016. № 2. S. 58–60.

6. Grigoriev N.P., Vlasenko S.A., Parfianovich A.P. Normal'nye skhemy pitaniya tyagovykh nagruzok [Normal power supply schemes for traction loads] // Povysheniye effektivnosti transportnoj sistemy regiona: problemy i perspektivy : materialy Vseros. nauch-prakt. konf. s mezhdunar. uchst. V 3 t. T.2 ; pod red. S.M. Goncharuka. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2015. S. 63–69.

7. Ob utverzhdenii Instruksii o poryadke planirovaniya, razrabotki, predostavleniya i ispol'zovaniya tekhnologicheskikh «okon» dlya remontnykh i stroitel'no-montazhnykh rabot v OAO «RZhD» [On approval of the Instruction on the procedure for planning, development, provision and use of technological «windows» for repair and construction-and-installation works in JSC Russian Railways] : rasporyazheniye OAO «RZhD» ot 25.02.2019 g. № 348/r.

Информация об авторах

Н.П. Григорьев – кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения»;

И.Г. Копай – старший преподаватель;

О.А. Малышева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»;

А.П. Парфианович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;

П.Н. Трофимович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика».

Information about the authors

N.P. Grigoriev – Candidate of Science (Engineering), Professor, Department of Electric Power Supply Systems;

I.G. Kopay – Senior Lecturer;

O.A. Malysheva – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics;

A.P. Parfianovich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems;

P.N. Trofimovich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics.

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 17.03.2025.

The article was submitted: 27.02.2025; approved after reviewing: 17.03.2025; accepted for publication: 17.03.2025.

Научная статья
УДК 621.332.31:625.1:624.078.5
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-49-56

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ И МОНИТОРИНГЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Демина Людмила Сергеевна¹, Власенко Сергей Анатольевич²,
Ли Валерий Николаевич³, Игнатенко Иван Владимирович⁴

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

³ Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, livn47@mail.ru

¹ shtakal@mail.ru

² vsa_ens@mail.ru

⁴ eao79@yandex.ru

Аннотация. Железобетонные опоры сохраняют лидирующие позиции в структуре опорного хозяйства железных дорог Российской Федерации, что подтверждается статистикой эксплуатационного парка. Увеличение количества опор с длительным сроком эксплуатации требует постоянного проведения диагностирования их состояния. Предмет исследования – анализ возможностей проведения технического диагностирования и его порядок в условиях эксплуатации. Изучены существующие способы проведения неразрушающего контроля, способы, датчики контроля параметров и выявления дефектов. Рассмотрен нейросетевой подход к определению элементов контактной сети, таких как железобетонные опоры, и порядок реализации технологии машинного зрения для целей диагностирования опорного хозяйства. Проведен анализ применения мониторинга состояния конструкций на основе непрерывного сбора данных о структурных изменениях и оценка жизненного цикла, результатом которого станет прогнозирование износа и остаточного ресурса. Предложена система принятия решений на базе данных, способствующая оптимизации технического обслуживания и сокращению финансовых издержек на эксплуатацию опорного хозяйства.

Ключевые слова: железобетонная опора, диагностика, мониторинг, машинное зрение

Original article

NEW APPROACHES IN THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTS OF THE CONTACT NETWORK WITH A LONG SERVICE LIFE

Demina Lyudmila S.¹, Vlasenko Sergey A.², Li Valeriy N.³, Ignatenko Ivan V.⁴

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

³ Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, livn47@mail.ru

¹ shtakal@mail.ru

² vsa_ens@mail.ru

⁴ eao79@yandex.ru

Annotation. Reinforced concrete supports retain a leading position in the structure of the support facilities of the railways of the Russian Federation, which is confirmed by the statistics of the operating fleet. An increase in the number of supports with a long service life requires constant diagnostics of their condition. The subject of the research is the analysis of the possibilities of technical diagnostics and the procedure for its implementation in operating conditions. Existing methods of non-destructive testing, methods, sensors for parameter control and defect detection are studied. The application of the neural network approach to determining the elements of the contact network, such as reinforced concrete supports, and the procedure for implementing machine vision technology for the purpose of diagnosing the support facilities are considered. An analysis of use of the structures condition's monitoring based on continuous collection of data on structural changes, an assessment of the life cycle, the result of which will be the prediction of wear and residual life, is carried out. A data-driven decision-making system is proposed, which contributes to the optimization of maintenance and the reduction of financial costs for the operation of the support facilities.

Keywords: reinforced concrete support, diagnosis, monitoring, machine vision

Введение

В современных условиях электрический транспорт занимает лидирующие позиции среди решений, способных обеспечить стабильный пассажиропоток и эффективные грузоперевозки. Помимо высокой производительности, электропоезда выделяются экологической безопасностью и минимальным воздействием на окружающую среду.

Ключевой элемент системы – контактная сеть, гарантирующая бесперебойную передачу энергии даже на предельных скоростях движения. Особую роль в этой инфраструктуре играют опоры, поддерживающие работоспособность всей сети: повреждение даже одной из них способно вызвать масштабные сбои.

Эти конструкции применяются глобально не только в железнодорожном транспорте, но и для монтажа ЛЭП, линий связи, уличного освещения. Традиционно их изготавливали из дерева, стали и бетона. В дальнейшем получили применение предварительно напряженные центрифугированные железобетонные, металлические и композитные опоры. Железобетонные опоры сочетают экономичность, долговечность и низкие эксплуатационные расходы, что обусловило их массовое внедрение [1]. Например, в Германии тысячи таких опор установлены вдоль высокоскоростных магистралей. Во Франции, Дании, Нидерландах и других европейских странах их рассматривают как замену стальным решетчатым конструкциям.

При этом научные исследования концентрируются преимущественно на смежных аспектах: взаимодействии железных дорог с грунтом, аэродинамических нагрузках от поездов, динамике контакта пантографа с проводами. Непосредственно опоры контактной сети остаются малоизученными, особенно их долгосрочное поведение под нагрузкой. Учитывая критическую роль этих конструкций и масштабы их применения, актуализируется потребность в углубленном анализе их жизненного цикла, включая деформации, износ и адаптацию к возрастающим эксплуатационным требованиям.

Таким образом, развитие методов оценки и модернизации опорных систем представляет собой стратегическую задачу для обеспечения надежности современных транспортных и энергетических сетей.

Ключевой вызов в обслуживании контактной сети связан с оценкой технического состояния её элементов, в особенности железобетонных опор. Современные методы диагностики [2] фокусируются на контроле параметров [3–5], характеризующих их целостность, однако, используемое оборудование не обеспечивает достаточной точности измерений, что приводит к отсутствию достоверных данных о текущем состоянии опор и невозможности прогнозирования аварийных ситуаций и системного анализа причин отказов.

Решение проблемы видится во внедрении комплексного подхода, объединяющего регулярную диагностику с прогнозированием изменений в ходе эксплуатации [6]. Такой метод позволяет точнее оценивать динамику износа конструкций.

В основе проектирования элементов контактной сети лежит метод предельных состояний, согласно которому расчеты выполняются для условий, когда конструкция утрачивает функциональность [7]. Анализ проводится по следующим критериям:

- потери несущей способности – оценивается риск разрушения из-за потери прочности, устойчивости или усталости материала;
- превышения допустимых деформаций – учитываются смещения, вибрации и прогибы, влияющие на безопасность эксплуатации;
- образования трещин – прогнозируется развитие повреждений в бетонных и железобетонных элементах, снижающих долговечность конструкции.

Интеграция этих принципов в систему мониторинга позволит не только фиксировать текущие дефекты [8], но и предотвращать критические состояния, минимизируя риски аварий. В основу системы оценки технического состояния железобетонных опор контактной сети положен метод допускаемых технических состояний.

Оценка технического состояния и мониторинг параметров железобетонных опор

Под допускаемым техническим состоянием понимается состояние, при котором конструкция и ее основание под влиянием совместного воздействия силовых факторов, факторов окружающей среды и времени перестают удовлетворять требованиям, регламентированным режимами эксплуатации, например, категориями технического состояния [8, 9].

Метод допускаемых технических состояний является разновидностью метода предельных состояний применительно к эксплуатируемым сооружениям и в принципе, характеризует вторую группу предельных состояний, затрудняющих или ограничивающих, нормальную эксплуатацию вследствие возникающих деформаций, повреждений и дефектов.

Работу по оценке технического состояния железобетонных опор следует производить в четыре этапа.

I этап. Изучение проектной, исполнительной документации и условий эксплуатации.

II этап. Проведение комплекса натурных обследований, определенных на основании соответствующих норм и руководств.

III этап. Ранжирование на основе результатов обследования.

IV этап. Выработка решений о необходимости проведения ремонта, замене (демонтажа) или дальнейшей эксплуатации.

Контроль состояния железобетонных опор контактной сети осуществляется комплексно, с использованием визуальных, инструментальных и современных технологических методов.

Основные этапы и методы.

1. Визуальный осмотр с целью определения ориентации дефектов:

- по странам света;
- к направлению движения поездов;
- в сжатой или растянутой зонах опор;
- по высоте локализации от поверхности грунта;

2. Инструментальные методы неразрушающего контроля (НК):

- измерение ширины и длины трещин тарированными щупами;
- оценка прочности бетона;
- контроль коррозии арматуры (для систем постоянного тока);
- измерение геометрических параметров.
- маркировка дефектов.

3. Оценка технического состояния железобетонных опор контактной сети.

Современные технологии мониторинга:

- вибродиагностика: анализ собственных частот опоры для выявления структурных изменений;
- оптоволоконные датчики: мониторинг деформаций и температуры в реальном времени;
- дроны с тепловизорами и LiDAR: обследование труднодоступных участков, создание цифровых двойников;
- платформы интернета-вещей: сбор данных с датчиков (вибрация, влажность, нагрузка) для прогнозной аналитики.

В табл. 1 приведены критерии оценки состояния железобетонных опор контактной сети на основании выявленных признаков инструментального обследования [8].

Таблица 1

Критерии оценки состояния

Категория состояния	Признаки	Действия
Нормальное	Дефекты отсутствуют или незначительны	Плановый контроль
Удовлетворительное	Локальные повреждения бетона, коррозия	Усиление, антикоррозионная обработка
Аварийное	Трещины, оголение арматуры, наклон	Немедленный ремонт или замена

Мониторинг состояния железобетонных опор в контактной сети имеет решающее значение для обеспечения целостности конструкции, безопасности и долговечности. Данные конструкции подвергаются воздействию механического напряжения, факторов окружающей среды (температура, влажность, соль) и электрических нагрузок. Ниже приведена подробная методология мониторинга их состояния.

1. Ключевые параметры для мониторинга опоры:

- трещины и деформация: поверхностные трещины, прогиб;

- наклон: отклонения от вертикальной/горизонтальной ориентации;

- вибрация и динамические нагрузки: скорость ветра, воздействие движения поездов;

- воздействие окружающей среды: влажность, температура, циклы замораживания-оттаивания и химическое воздействие.

2. Методы и технологии мониторинга. В табл. 2 приведены характеристики используемых датчиков [9].

Методы исследования и мониторинга.

1. Неразрушающий контроль (НК):

- ультразвуковая дефектоскопия: оценка глубины и направления трещин.

- акустическая эмиссия: фиксация звуковых волн при образовании трещин.

- тепловизионное обследование: выявление скрытых дефектов через температурные аномалии;

- электроимпедансная томография: анализ распределения влаги и коррозии.

2. Компьютерное моделирование:

- метод конечных элементов: прогнозирование напряжений и зон риска;

- искусственный интеллект: анализ данных с датчиков для предсказания развития трещин (например, нейросети).

3. Сенсорные системы:

- встроенные датчики (оптоволоконные, пьезоэлектрические) для мониторинга в реальном времени;

- системы на основе интернета-вещей для удаленного сбора данных.

4. Интеграция с системами обслуживания:

- цифровой двойник: создание трехмерной модели структуры опоры для моделирования напряжения и прогнозирования сбоев;

- прогнозируемое обслуживание: график ремонтов на основе данных датчиков (например, предупреждения о коррозии);

- географическая информационная система (ГИС): отображение местоположения и состояния опоры в сети на географической карте.

Объединив датчики неразрушающего контроля в реальном времени, анализ полученных результатов и профилактическое обслуживание, работники дистанции электроснабжения смогут обеспечить надежность усиленных бетонных опор в контактных сетях, минимизируя риски безопасности и оперативное время простоя.

Таблица 2

Датчики для мониторинга в реальном времени

Тип датчика	Назначение	Установка
Деформационные датчики	Измерение механического напряжения в бетоне	Встраивается в критические секции (например, основание, стыки)
Датчики наклона	Обнаружение наклона или смещения	Монтируется на опорную конструкцию
Акселерометры	Мониторинг вибраций и динамических нагрузок	Крепится к опоре или фундаменту
Датчики коррозии	Обнаружение коррозии арматуры с помощью удельного сопротивления или электрохимических методов	Встраивается рядом с арматурой
Датчики трещины	Отслеживание распространения трещин (например, волоконно-оптические датчики или пьезоэлектрические датчики)	Приклеивается к бетонным поверхностям
Датчики влажности/температуры	Контроль проникновения влаги и теплового расширения	Устанавливается внутри или на поверхность
Ультразвуковые датчики	Обнаружение внутренних пустот или расслоений	Накладной или встраиваемый

Применение системы машинного зрения для определения параметров устройств контактной сети

Для систематизации данных, а также автоматизации процесса диагностирования и применения единой базы данных о состоянии опорного хозяйства требуется реализация современных систем машинного зрения [9], позволяющих на основе использования подвижного состава и средств диагностирования получать своевременную информацию о состоянии железобетонных опор [10].

Система включает следующие компоненты [11]:

- видеокamеры с матричным сенсором и цифровым интерфейсом для подключения к компьютеру;
- персональный компьютер для локальной обработки данных;
- программное обеспечение для цифровой записи изображений в реальном времени, первичной и измерительной обработки данных;
- крепежные элементы и соединительные кабели.

Обработка данных осуществляется в стационарных условиях с использованием программы автоматического распознавания элементов сети и оценки их состояния на основе тепловизионных изображений, записанных в режиме реального времени [11].

Программный комплекс состоит из следующих модулей:

- драйвера загрузки файлов с внешнего накопителя, содержащего тепловизионные изображения;
- модуля просмотра с формированием гистограммы яркости для текущего кадра;
- инструмента дефрагментации для выделения и сохранения фрагментов видео из исходного файла;
- панели настройки параметров программы (качество изображения, условия съемки);
- геопривязки изображений к координатам железнодорожного пути.

Реализация алгоритма дистанционного метода определения состояния опор контактной сети представлена в виде схемы (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм дистанционного метода определения состояния опор контактной сети

Программа устанавливается на бортовой компьютер или компьютеры служб электрификации и дистанций электроснабжения, соответствующие требованиям к производительности.

Алгоритм работы системы (рис. 2):

- 1) из общего видеофайла выделяется фрагмент по заданным номерам кадров, который сохраняется как отдельный именованный файл;
- 2) модуль анализа дефрагментирует видео, выделяя участки опор с дефектами;
- 3) кадры с дефектами дополняются метаданными: время записи, номер опоры, участок пути. Эти фрагменты сохраняются для дальнейшего анализа.

Требования к отчету (протоколу):

- реквизиты объекта (название, местоположение, тип);
- номер и дата утверждения документа;
- дата обследования;
- тип и серийный номер оборудования;

- результаты измерений;
- список выявленных дефектов;
- рекомендации по устранению;
- подписи ответственных лиц.



Рис. 2. Реализация технологии машинного зрения

Методология работы

Система основывается на анализе тепловизионных изображений и данных измерительного оборудования. Установка оборудования: на крыше вагона; на наземной платформе (при необходимости мобильного использования). Процесс передачи данных: изображение передается в блок обработки сигналов, где формируется потоковое видео. Блок сопряжения интегрирует данные: координаты GPS; время и дату; цифровую карту рельефа местности. Видеопоток и параметры сохраняются в базе данных и направляются в блок анализа. Блок обработки изображений взаимодействует с модулем сбора результатов, передавая данные на сенсорный дисплей для визуализации и ручного управления (например, записи фото/видео конкретного участка). Сенсорный интерфейс обеспечивает контроль измерений и позволяет оператору вручную инициировать регистрацию параметров на выбранных участках пути.

Метод мониторинга состояния опор контактной сети

Современные инфраструктурные вызовы требуют внедрения систем мониторинга, способных отслеживать структурную целостность объектов на протяжении всего жизненного цикла. Это позволяет не только прогнозировать потенциальные повреждения, но и своевременно принимать превен-

тивные меры. Особую актуальность такие решения приобретают в контексте глобального перехода к «умным» инфраструктурам, где автоматизация и анализ данных играют ключевую роль.

Для обеспечения надежности опор контактной сети необходим комплексный подход, включающий следующее:

- мониторинг состояния конструкций (МСК): непрерывный сбор данных о структурных изменениях;
- структурный анализ и оценку жизненного цикла: прогнозирование износа и остаточного ресурса;
- принятие решений на основе данных: оптимизация технического обслуживания.

Разработка систем оперативной диагностики, способных в реальном времени оценивать состояние опор в процессе эксплуатации, становится критически важной. Это повышает точность управленческих решений и снижает риски аварий.

Внедрение систем структурного мониторинга – сложная научно-техническая задача, особенно в гражданском строительстве. Ключевые объекты, такие как исторические памятники или стратегические мосты, уже оснащаются датчиками, фиксирующими малейшие изменения. Актуальность МСК усиливается необходимостью продления срока службы стареющих конструкций.

Стандартная система МСК включает:

- сеть датчиков: сбор данных о вибрациях, деформациях, коррозии;
- аналитический модуль: применение алгоритмов машинного обучения и диагностических методов для выявления аномалий;
- прогностику: оценка степени повреждений и остаточного ресурса конструкции.

Несмотря на прогресс в области обнаружения повреждений, многие методы остаются узкоспециализированными. Например, решения, эффективные для авиационных конструкций или морских платформ, могут не работать для мостов или опор ЛЭП из-за уникальности каждого объекта. Надежность МСК зависит от множества факторов: изменений нагрузки, граничных условий, температурных колебаний и деградации материалов.

Универсализация подходов требует интеграции технологий:

- цифровые двойники: моделирование структурного поведения в реальном времени;
- аналитика искусственного интеллекта: автоматизация интерпретации больших данных;
- квантовая оценка рисков: учет неопределенностей при прогнозировании.

Таким образом, эволюция МСК связана с переходом от реактивного обслуживания к предиктивным решениям, что особенно важно в условиях роста нагрузки на инфраструктурные системы.

Иерархическая система проверки повреждений включает четыре последовательных этапа.

I этап. Выявление дефектов.

II этап. Определение их местоположения.

III этап. Оценка степени тяжести

IV этап. Прогнозирование остаточного ресурса конструкции

Для реализации вышеназванных задач методы обнаружения повреждений интегрируются со смежными областями, включая статистический анализ и неразрушающий контроль, что позволяет своевременно выявлять начальные признаки деградации и поддерживать работоспособность объектов. В отличие от периодических проверок традиционными методами, системы структурного мониторинга (МСК) обеспечивают непрерывное наблюдение в реальном времени, повышая эффективность контроля. Этому способствует развитие технологий анализа данных, машинного обучения и компьютерного зрения.

В зависимости от доступности данных МСК-системы применяют два подхода к диагностике.

Контролируемый подход использует эталонные данные как исправного, так и повреждённого состояний для классификации текущего состояния конструкции.

Неконтролируемый подход актуален в гражданском строительстве, где чаще доступны данные только о нормальном состоянии. Любое отклонение от этих параметров интерпретируется как признак повреждения.

Методы обнаружения повреждений:

- данно-ориентированные анализ информации от датчиков (тензометры, акселерометры);
- модельно-ориентированные: использование численных моделей для идентификации дефектов путём калибровки на основе измерений МСК;
- гибридные: комбинация обоих методов, обеспечивающая комплексный охват всех четырёх этапов диагностики.

Точность модельно-ориентированных методов зависит от адекватности используемых расчётных моделей. Их калибровка выполняется в двух областях:

1) частотной области: методы спектральной плотности мощности и частотного разложения, устойчивые к шумам и близким модам;

2) временной области: алгоритмы на основе подпространств, такие как стохастическая идентификация (СИ), эффективные при анализе выходных данных систем со случайным возбуждением.

Выбор области зависит от типа задачи, характеристик конструкции и доступности входных/выходных измерений, что подчёркивает важность адаптивного подхода в диагностике.

В современных исследованиях выделяют два направления реализации SSI (идентификации структурных состояний): данно-ориентированный подход

и ковариационный метод. Несмотря на различия в методологии, оба демонстрируют схожую точность при оценке модальных параметров конструкций.

Данно-ориентированный СИ фокусируется на анализе состояния структур через призму обработки сигналов и современных статистических методов [10].

Методы обработки сигналов, такие как анализ вибрационных данных с датчиков, эмпирическая модовая декомпозиция и преобразование Гильберта–Хуанга, эффективны для выявления повреждений уровня 1 и частично уровня 2. Однако их возможностей недостаточно для сложных инженерных задач.

Статистические методы (авторегрессионные модели, машинное обучение, нейросети, гауссовские процессы) создают шаблоны структурных состояний. В контролируемых условиях распознавание основано на алгоритмах классификации, а в неконтролируемых – на методах обнаружения новизны, анализе изменений и дефектных картах. Главный недостаток – высокая вычислительная сложность и длительное обучение моделей, что делает их малоприменимыми для масштабных систем, таких как опоры контактной сети, требующих мониторинга тысяч элементов.

Предлагаемый безмодельный подход устраняет эти ограничения за счёт использования логистических функций для бинарной классификации состояний («повреждение»/«отсутствие повреждения») на основе данных системы МСК. Его ключевые преимущества:

- отказ от этапа обучения: в отличие от методов машинного обучения, не требует ресурсоемкой тренировки моделей;
- интеграция параметров: множественные признаки повреждения агрегируются в единый индекс, упрощающий интерпретацию;
- дифференциация типов повреждений: разделение долговременной деградации материала и локальных дефектов.

Реализация мониторинга (рис. 3) включает:

- сравнение новых данных МСК с эталонными («здоровыми») показателями;
- обновление эталонных данных при отсутствии повреждений;
- автоматическое обнаружение аномалий через логистические функции, что исключает необходимость сложных расчетов.

Этот подход особенно актуален для предварительно напряженных опор контактной сети грузонапряженных участков, где критически важны оперативность и простота анализа. Его применение позволяет перейти от трудоемких методов машинного обучения к быстрому и наглядному инструменту диагностики, адаптированному для работы в реальных условиях.

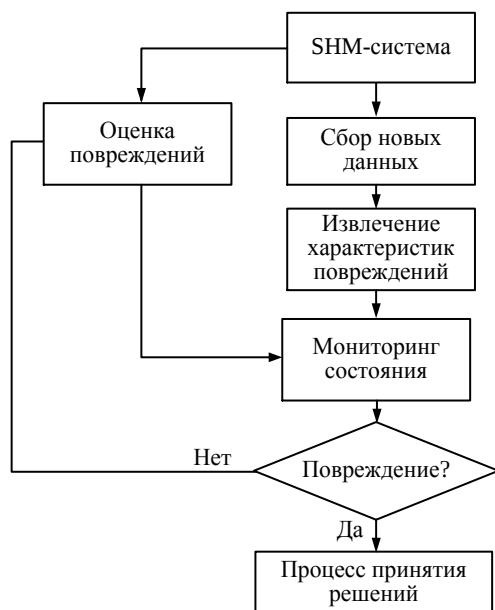


Рис. 3. Подход к мониторингу состояния

Для повышения точности диагностики используется усовершенствованный подход к классификации повреждений, в который могут быть интегрированы дополнительные алгоритмы локализации и количественной оценки повреждений. Предлагаемый метод модернизирует классические дефектные карты, адаптируя их для оценки состояния

конструкций, в дальнейшем на основе эталонных значений выделяя параметры зон работоспособного и неработоспособного состояний.

Результаты исследования демонстрируют потенциал для внедрения в инфраструктурные объекты консольного типа (опоры ЛЭП, мачты связи, ветрогенераторы), где наличие предварительного напряжения маскирует микротрещины. Решение поддерживает использование беспроводных датчиков, снижая затраты на мониторинг. Полученные данные предоставляют специалистам инструмент для обоснованного выбора стратегий ремонта, замены или модернизации конструкций. Особый вклад работы заключается в адаптации методов машинного обучения для задач структурного мониторинга с акцентом на рентабельность и масштабируемость в промышленных условиях.

Таким образом, внедрение дополнительного диагностирования и мониторинга позволит:

- увеличить объем данных о состоянии опор контактной сети; отслеживать динамику изменения параметров;
- вовремя производить ремонт и замену дефектных опор;
- снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций;
- снизить затраты, связанные с простоем поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демина Л.С., Ли В.Н., Власенко С.А. Оценка состояния железобетонных опор контактной сети переменного тока. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. 102 с. EDN RHWDQH.
2. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 № 1047/р (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 19.01.2023 г. № 91/р).
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1). Москва : АО «Кодекс», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 05.02.2025).
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (акт. редакция СНиП 2.01.07-85). Москва : АО «Кодекс», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554402880> (дата обращения: 05.02.2025).
5. ГОСТ 19330-2013. Стойки для опор контактной сети железных дорог. Технические условия. Введ. 2014.06.01. Москва : Стандартинформ, 2014. 70 с.
6. Ли В.Н., Демина Л.С., Власенко С.А. Методика прогнозирования остаточного ресурса опор контактной сети // Транспорт Урала. 2021. № 1(68). С. 93–98.
7. Ли А.Г., Демина Л.С. Анализ методов оценки несущей способности железобетонных опор контактной сети магистральных железных дорог // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : тезисы докладов юбилейной 70-й межвузовской студенческой научной конференции, 10 апреля 2012 г. В 2 т. ; под ред. А.З. Ткаченко. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. С. 162–163. EDN: QXBCZM.
8. Alkam F., Lahmer T. A robust method of the status monitoring of catenary poles installed along high-speed electrified train tracks // Results Eng. 2021. № 12. P. 100289.
9. Alemu Y.L., Lahmer T., Walther C. Damage Detection with Data-Driven Machine Learning Models on an Experimental Structure // Eng. 2024. № 5. Pp. 629–656.
10. Railway Catenary Condition Monitoring: A Systematic Mapping of Recent Research / S. Chen, G.T. Frøseth, S. Derosa [et al.] // Sensors. 2024. № 24. P. 1023.
11. Власенко С.А., Игнатенко И.В. Мониторинг и диагностика болтовых электрических соединений системы тягового электроснабжения. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2022. 107 с. EDN: RZLIMR.

REFERENCES

1. Demina L.S., Lee V.N., Vlasenko S.A. Otsenka sostoyaniya zhelezobetonnykh opor kontaktnoj seti peremennogo toka [Assessment of the state of reinforced concrete supports of the alternating current contact network]. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2023. 102 s. EDN: RHWDQH.
2. Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruksij kontaktnoj seti. [Instructions for maintenance and repairs of supporting structures of contact network] : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 18.04.2022 g. № 1047/r (v redaktsii rasporyazheniya OAO «RZhD» ot 19.01.2023 g. № 91/r).
3. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozeniya. SNiP 52-01-2003 (s izmeneniyem № 1) [SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. SNiP 52-01-2003 (with a change № 1)]. Moskva : AO «Kodeks», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554403082> (data obrashcheniya: 05.02.2025).
4. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdejstviya [SP 20.13330.2016. Loads and Exposure] (act. redaktsiya SNiP 2.01.07-85). Moskva : AO «Kodeks», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/5544402880> (data obrashcheniya 05.02.2025).
5. GOST19330-2013. Stojki dlya opor kontaktnoj seti zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya [GOST19330-2013. Racks for supports of the railway contact network. Specifications]. Vved. 2014.06.01. Moskva : Standartinform, 2014. 70 s.
6. Lee V.N., Demina L.S., Vlasenko S.A. Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa opor kontaktnoj seti [Methodology for predicting the residual life of contact network supports] // Transport Urala. 2021. № 1(68). S. 93–98.
7. Lee A.G., Demina L.S. Analiz metodov otsenki nesushchej sposobnosti zhelezobetonnykh opor kontaktnoj seti magistral'nykh zheleznykh dorog [Analysis of methods for assessing the bearing ability of reinforced concrete supports of the contact network of the main railways] // Nauchno-tekhnicheskiye problemy transporta, promyshlennosti i obrazovaniya : tezisy dokladov yubilejnoj 70-j mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferentsii, 10 aprelya 2012 g. V 2 t. / pod red. A.Z. Tkachenko. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2012. S. 162–163. EDN: QXBCZM.
8. Alkam F., Lahmer T. A robust method of the status monitoring of catenary poles installed along high-speed electrified train tracks // Results Eng. 2021. № 12. P. 100–289.
9. Alemu Y.L., Lahmer T., Walther C. Damage Detection with Data-Driven Machine Learning Models on an Experimental Structure // Eng. 2024. № 5. P. 629–656.
10. Railway Catenary Condition Monitoring: A Systematic Mapping of Recent Research / S. Chen, G.T.Frøseth, S. Derosa [et al.] // Sensors. 2024. № 24. P. 1023.
11. Vlasenko S.A., Ignatenko I.V. Monitoring i diagnostika boltovykh elektricheskikh soedinenij sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Monitoring and diagnostics of bolted electrical connections of the traction power supply system]. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2022. 107 s. EDN: RZLIMR.

Информация об авторах

Л.С. Демина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;
С.А. Власенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;
В.Н. Ли – доктор технических наук, профессор, консультант Управления научно-исследовательской деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета;
И.В. Игнатенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения».

Information about the authors

L.S. Demina – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems;
S.A. Vlasenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems;
V.N. Lee – Doctor of Science (Engineering), Professor, Consultant of the Directorate of Scientific-and-Research Activities of Komsomolsk-na-Amure State University;
I.V. Ignatenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems.

Статья поступила в редакцию 11.02.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; принята к публикации 27.02.2025.
The article was submitted: 27.02.2025; approved after reviewing: 27.02.2025; accepted for publication: 27.02.2025.

Научная статья
УДК 621.332.31:625.1:624.078.5
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-57-64

ДЕФЕКТОБРАЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Демина Людмила Сергеевна¹, Власенко Сергей Анатольевич²,
Ли Валерий Николаевич³, Березуцкий Юрий Николаевич⁴

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

³ Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, livn47@mail.ru

¹ shtakal@mail.ru

² vsa_ens@mail.ru

⁴ berezutskyiu@yandex.ru

Аннотация. Железобетонные опоры сохраняют лидирующие позиции в структуре опорного хозяйства железных дорог Российской Федерации, что подтверждается статистикой эксплуатационного парка. Увеличение количества опор с длительным сроком эксплуатации требует постоянного проведения диагностирования их состояния. Предмет исследования – процесс дефектообразования в железобетонной опоре со сроком службы более 40 лет. Длительная эксплуатация приводит к усложнению процесса определения остаточной несущей способности и предельного срока службы. Существующая математическая модель требует унификации в применении для оценки остаточного срока службы различных типов опор. Предложено проводить дальнейший прогноз срока службы на основании верифицированных современных программных комплексов, учитывающих многофакторное вероятностное воздействие. Рассмотрена возможность применения программного продукта для расчета нормативных нагрузок железобетонных опор контактной сети с использованием языка программирования Python. Предложено дальнейшее совершенствование математических моделей оценки остаточной несущей способности с использованием современных программных средств моделирования строительных конструкций.

Ключевые слова: железобетонная опора, дефектообразование, программный продукт, Python

Original article

DEFECT FORMATION OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTS OF THE CONTACT NETWORK WITH A LONG SERVICE LIFE

Demina Lyudmila S.¹, Vlasenko Sergey A.², Li Valeriy N.³, Berezutsky Yuri N.⁴

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

³ Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, livn47@mail.ru

¹ shtakal@mail.ru

² vsa_ens@mail.ru

⁴ berezutskyiu@yandex.ru

Annotation. Reinforced concrete supports retain a leading position in the structure of the support facilities of the railways of the Russian Federation, which is confirmed by the statistics of the operating fleet. An increase in the number of supports with a long service life requires constant diagnostics of their condition. The subject of the study is the process of defect formation in a reinforced concrete support with a service life of more than 40 years. Long-term operation complicates the process of determining the residual bearing capacity and service life limits. The existing mathematical model requires unification in its application to assess the residual service life of different types of supports. It is proposed to carry out a further forecast of the service life on the basis of verified modern software complexes that take into account the multifactorial probabilistic impact. The possibility of using the software product for calculating the standard loads of reinforced concrete supports of the contact network using the Python programming language is considered. Further improvement of mathematical models for estimating the residual bearing capacity using modern software tools for modeling building structures is proposed.

Keywords: reinforced concrete support, defect formation, software product, Python

На долю железных дорог приходится больше половины грузооборота России, которая находится в числе первых стран по протяженности электрифицированных железных дорог. В программе экономического развития страны электрификации от-

водится достойное место. Предусматривается дальнейшее повышение качества устройств энергоснабжения и, как следствие, бесперебойности в работе движения поездов.

Железобетонные опоры контактной сети, будучи нерезервируемым компонентом системы тягового электроснабжения [1], требуют повышенного внимания к их надёжности. Исторически данная проблема возникла одновременно с электрификацией железных дорог, но масштабно проявилась после массового внедрения железобетонных конструкций. Их доминирование в эксплуатационном парке, а также расширение функциональных и климатических условий эксплуатации обусловили необходимость разработки новых методов диагностики и оценки остаточного ресурса.

В ходе эксплуатации опоры контактной сети подвергаются комплексному воздействию разнообразных внешних факторов, к которым относятся:

- механические нагрузки (вес проводов, оборудования, динамическое воздействие подвижного состава);
- климатические воздействия (ветровые нагрузки, перепады температур, осадки);
- химико-экологические факторы (коррозионная активность грунтов, загрязнение атмосферы).

Совокупность этих воздействий приводит к прогрессирующему ухудшению состояния конструкций, проявляющемуся в виде: образования трещин и локальных разрушений бетона; развития коррозии арматурного каркаса; снижения несущей способности опор [1].

Различные комбинации тех или других факторов со временем приводят к потере несущей способности опоры, что в свою очередь может способствовать, в худшем случае излому и падению опоры, а далее – обрыву проводов контактной сети, нарушению электроснабжения и графика движения поездов.

Согласно исследованию [1], начальные дефекты конструкций (микротрещины, локальная коррозия) формируются в течение 25 лет эксплуатации. При этом расчетный ресурс усталостной долговечности материалов составляет 40 лет, что подтверждается натурными наблюдениями за опорами в реальных условиях. Фактически срок службы таких конструкций на данный момент превышен кратно, с удвоением первоначальных расчётных показателей. В связи с этим, в соответствии с принципами надёжности, при проектировании изначально закладывается нормативный срок эксплуатации с дополнительным запасом прочности [2].

По состоянию на 01.09.2024 г. на балансе одной из дистанций электроснабжения Забайкальской железной дороги находится 11 888 опор контактной сети, в том числе: железобетонных – 10 895, металлических – 993. Срок эксплуатации всех железобетонных опор достиг 40 лет, доля дефектных опор составляет всего 1,6 % (174 шт.).

Таким образом, на сети железных дорог России в настоящее время в эксплуатации находится значительный парк железобетонных опор контактной

сети с длительным сроком эксплуатации (относительно нормативного), при этом доля дефектных стоек составляет низкий процент от общего числа. Следовательно, существует необходимость разработки программного решения для оценки текущего состояния железобетонных опор (остаточной несущей способности) с учетом всевозможного факторного внешнего воздействия с последующим формированием срока жизни каждой опоры.

Основные проблемы опор – дефекты и устойчивость. В статье рассматриваются вопросы только дефектности, с условием, что стержень жестко закреплен в теле земляного полотна. Анализ дефектов железобетонных опор показал, что причинами их появления являются нарушения в технологии изготовления, температурно-влажностные воздействия окружающей среды, процессы химического перерождения бетона [1, 3].

При изготовлении опор основными нарушениями технологии выступают неправильный подбор состава бетона, нарушение режимов термообработки, ударный отпуск напряженной арматуры, неправильное хранение после изготовления [1]. В результате в опорах формируется недостаточно плотная структура бетона, в вершинной части возникает утоньшение стенки, в местах анкеровки арматуры появляются трещины раскалывания. Следствие этих отступлений – микротрещины и трещины в бетоне уже на стадии изготовления. В процессе эксплуатации они развиваются, снижая несущую способность [4] и ускоряя выработку ресурса.

Температурно-влажностное воздействие окружающей среды выражается в виде циклического замораживания и оттаивания бетона, что с течением времени ведет к его расшатыванию (объем льда на 90 % превышает объем замораживаемой воды), возникновению дополнительных повреждений, доводящих повреждения бетона до его разрыва [5]. Такие процессы свойственны центрифугированным тонкостенным опорам при их недостаточной плотности и нерегулярном обжатии бетона предварительно-напряженной арматурой.

Основная особенность центрифугированной опоры – высокая неоднородность бетона по толщине стенки. Даже при соблюдении всех технологических требований снаружи образуется слой плотного бетона, затем – мелкозернистого и на внутренней поверхности – рыхлого слоя шлама. Естественно, при некачественном изготовлении такая неоднородность возрастает. Слой шлама имеет большую способность к водонасыщению и при плохой вентиляции опоры почти полностью влагонасыщен. После промерзания этот слой получает деформацию расширения и вызывает растягивающие усиления на поверхности опоры. В нижней части таких опор чаще всего наблюдаются дефекты

в виде отдельных продольных трещин, большей частью – в северном полукольце. Кроме того, сотрудниками ДВГУПС при рассмотрении температурных деформаций кольцевых конусообразных тел, подверженных прогреву с внешней поверхности в динамике дневного хода солнечного луча, выявлен термомеханический эффект [1], вызывающий поворот опоры и возрастание реактивного механического усилия в северном полукольце. Указанные механические усилия становятся причиной радиальных, касательных и меридиональных напряжений. Последние на 30–35 % ниже первых, но их влияние на поперечное трещинообразование очевидно. Появление поперечных и продольных трещин проходит одновременно, но если первые имеют размер в ангстремах, то вторые могут иметь величину первичного раскрытия до 1 мм. Вышеуказанные факторы объясняют появление продольных трещин в первые зимы эксплуатации.

Химическое перерождение цементного камня и появление в нём с течением времени новых продуктов – еще одна причина образования трещин. Химическое перерождение обусловлено действием материала бетона с компонентами атмосферы. Ведущим процессом здесь является карбонизация бетона, а это – его нейтрализация и снижение защитных свойств по отношению к металлу.

Заключение по химическому перерождению цементного камня возможно лишь после его химического анализа, который для обследованных опор, как правило, не проводится. Также необходимо учитывать, что карбонизация как процесс может расцениваться отрицательно с точки зрения защиты арматуры и одновременно положительно, поскольку приводит к уплотнению слоев бетона и снижению скорости его нейтрализации, продлевая тем самым срок службы конструкции, и в рассмотрение факторов трещинообразования не включается.

Продольные трещины – наиболее типичный вид повреждений центрифугированных опор. Они формируются на различных этапах жизненного цикла конструкции: а) на производстве: при распалубке, быстром охлаждении; б) в логистике: при транспортировке, монтаже; в) в эксплуатации: под нагрузкой и воздействием внешних факторов.

В условиях заводского производства продольные трещины преимущественно образуются на концевых участках струнобетонных опор. Основная причина их возникновения – расклинивание бетона предварительно напряжённой арматурой в момент, когда прочность материала ещё недостаточна для восприятия нагрузок. Такие трещины локализуются вдоль арматурных пучков, особенно в вершинах опор с тремя или четырьмя струнами, где возникают локальные перенапряжения. Дополнительный фактор риска – уменьшение толщины стенок

в верхней части опоры из-за продольного смещения бетонной смеси в процессе центрифугирования, характерного для пластичных составов.

Наиболее критичным периодом для образования трещин является зимний сезон. Низкие температуры замедляют набор прочности бетона, из-за чего к моменту распалубки материал не достигает проектных характеристик. Усугубляет ситуацию быстрое охлаждение опор после извлечения из пропарочных камер, создающее термические напряжения в структуре бетона. Бетон, обладая капиллярно-пористой структурой, подвержен деформациям, вызывающим два типа напряжений [1]:

- собственные (структурные) напряжения: возникают из-за ограниченной усадки цементного камня заполнителями (щебень, гравий) и арматурой. Величина напряжений может достигать предела прочности на растяжение;

- вынужденные деформации: обусловлены неравномерным высыханием бетона: наружные слои теряют влагу быстрее внутренних, создавая градиент напряжений.

Продольные трещины, вызванные температурными и усадочными напряжениями, развиваются наиболее интенсивно в начальный период эксплуатации – первые 5–7 лет после монтажа. Как показывают натурные наблюдения, далее их рост существенно замедляется. Это связано с релаксацией напряжений в бетоне после первичного раскрытия трещин, что снижает влияние исходных факторов. Однако в последующие годы в динамике дефектов начинают доминировать вторичные процессы:

- циклическое замерзание воды в устьевых зонах трещин приводит к их расширению за счёт кристаллизационного давления;

- продукты коррозии арматуры, создающие внутреннее давление на стенки трещин.

При этом замерзание воды во внутренних полостях центрифугированных опор (например, при эксплуатации в грунтах с высоким уровнем грунтовых вод) не провоцирует образование продольных трещин. Это объясняется отсутствием прямого контакта льда с напряжёнными зонами бетона в участках. Решением данных проблем является установка гидрофобных покрытий в устьевых зонах трещин для минимизации проникновения влаги, а также регулярный мониторинг ширины раскрытия трещин (превышение 0,5 мм требует ремонта по СП 28.13330).

Наиболее распространённой причиной образования поперечных трещин принято считать воздействие механических нагрузок. Однако их возникновение также может быть связано с недостаточным сцеплением бетона с арматурой. Согласно нормативным требованиям [2], раскрытие трещин данного типа не должно превышать 0,5 мм.

Для моделирования механических процессов в железобетонных конструкциях, к которым относятся балки, перекрытия, мосты, железобетонные опоры и другие, используются различные программные средства [6, 7]. Среди наиболее используемых и распространенных можно отметить такие как: ANSYS, SolidWorks, SAP2000, ETABS, STAAD.Pro, Autodesk Revit, Bentley Systems, MicroStation, PLS Tower, PLS-CADD Siemens NX, Solid Edge, FreeCAD, Blender, SkyCiv, Robot Structural Analysis, LIRA-FEM и др. Функционал программных средств различен: первые используют только механический расчет, вторые позволяют производить 3D-моделирование, третьи – получать готовое решение, в том числе чертежи и встраиваемые компоненты в другие системы.

Каждый программный продукт обладает своими положительными сторонами и недостатками. Имеются научные разработки в программной среде SolidWorks [8], в которых получены математические модели изменения напряженно-деформированного состояния железобетонной опоры с определением срока службы [9, 10]. Однако при использовании данной модели возникли ограничения как по вводу/исходу информации, так и по унификации для абсолютно всех опор.

В настоящее время основными требованиями к моделированию опор контактной сети являются следующие: структурный анализ (несущая способность, изгибающие моменты); статическое и динамическое моделирование нагрузок (ветер, гололед, вибрации, движение поездов); моделирование материалов (железобетон, сталь и композитные материалы); визуализация (геометрическое моделирование опор, фундаментов); совместимость (возможность интеграции с платформами CAD, GIS и BIM); проверка выполнения нормативных требований.

Предлагается рассмотреть возможность использования русскоязычной программной среды LIRA-FEM, которая содержит экспертизу железобетонных конструкций и позволяет выполнить анализ составных конструкций, моделируемых совокупностью объемных элементов, с выполнением для них конструктивных расчетов и различных проверок. После анализа возможности моделирования необходимо провести совмещение результатов моделирования для оценки остаточного срока службы опоры.

Дополнительно к программным средствам следует отнести напрямую языки программирования, которые на основе математической модели в условиях длительной эксплуатации конструкции позволяют производить унификацию расчета для железобетонных опор контактной сети с различной степенью дефектности, сокращая время на обработку входной информации и получения результатов.

В качестве наиболее используемого языка программирования в настоящее время предлагаем использовать Python.

Для определения нормативных нагрузок [11, 12], действующих на железобетонную опору контактной сети, разработан специальный программный продукт, содержащий цикл расчета и графический интерфейс взаимодействия с пользователем. Реализация программного кода в Python позволяет облегчить работу инженеров-проектировщиков и обслуживающего персонала дистанции электроснабжения за счет снижения количества выполняемых операций по сравнению с использованием существующих программных средств, а также снижения времени расчета и получения заключения об обеспечении несущей способности при различных сочетаниях нагрузок.

Для работы программы необходимо разработать интерфейс работы программы (рис. 1).

Построение интерфейса программы реализовано посредством Qt Designer и экспортировано в код Python (рис. 2).

Ниже представлен код программы расчета механических нагрузок, действующих на опру контактной сети в процессе эксплуатации (рис. 3).

На рис. 4 изображен результат проведения расчета в программе.

Таким образом, программа позволяет производить расчет нормативных нагрузок железобетонной опоры в режимах: гололеда с ветром (режим 1) и максимального ветра (режим 2), что позволяет выявить максимально допустимые механические нагрузки, действующие на опору, и оценить правильность выбора типа опоры для конкретного места установки.

Выводы

1. Железобетонные опоры в настоящее время составляют основную часть парка опорного хозяйства сети железных дорог Российской Федерации.

2. В эксплуатации находится большое количество опор контактной сети с длительным сроком эксплуатации.

3. Процесс дефектообразования в железобетонных опорах приводит к снижению несущей способности, поэтому дальнейший прогноз срока службы стойки должен проводиться на основании верифицированных современных программных комплексов, учитывающих многофакторное вероятностное воздействие.

4. Предложена методика расчета нормативных нагрузок железобетонных опор контактной сети с использованием языка программирования Python.

5. Разработан программный продукт для инженеров-проектировщиков, позволяющий унифицировать расчет для различных типов опор.

6. Предложено дальнейшее совершенствование математических моделей оценки остаточной несущей способности с использованием современных программных средств моделирования строительных конструкций.

```

opora2.py x main.py x ui_main.py x
21
16 usages
22 class Ui_MainWindow(object):
8 usages
23 def setupUi(self, MainWindow):
24 if not MainWindow.setObjectName():
25     MainWindow.setObjectName(u"MainWindow")
26     MainWindow.resize(1134, 600)
27     self.centralwidget = QWidget(MainWindow)
28     self.centralwidget.setObjectName(u"centralwidget")
29     self.label_6 = QLabel(self.centralwidget)
30     self.label_6.setObjectName(u"label_6")
31     self.label_6.setGeometry(QRect(150, 130, 49, 16))
32     self.label_3 = QLabel(self.centralwidget)
33     self.label_3.setObjectName(u"label_3")
34     self.label_3.setGeometry(QRect(40, 250, 61, 16))
35     self.label_10 = QLabel(self.centralwidget)
36     self.label_10.setObjectName(u"label_10")
37     self.label_10.setGeometry(QRect(330, 250, 91, 16))
38     self.label = QLabel(self.centralwidget)
39     self.label.setObjectName(u"label")
40     self.label.setGeometry(QRect(170, 60, 841, 20))
41     font = QFont()
42     font.setPointSize(16)
43     self.label.setFont(font)
44     self.label_8 = QLabel(self.centralwidget)
45     self.label_8.setObjectName(u"label_8")
46     self.label_8.setGeometry(QRect(330, 170, 81, 16))
47     self.label_11 = QLabel(self.centralwidget)
48     self.label_11.setObjectName(u"label_11")
49     self.label_11.setGeometry(QRect(330, 290, 91, 16))
50     self.label_12 = QLabel(self.centralwidget)
51     self.label_12.setObjectName(u"label_12")
52     self.label_12.setGeometry(QRect(260, 340, 101, 16))
53     self.label_2 = QLabel(self.centralwidget)
54     self.label_2.setObjectName(u"label_2")
55     self.label_2.setGeometry(QRect(40, 170, 91, 16))

```

Рис. 1. Фрагмент кода формирования интерфейса программы в Python

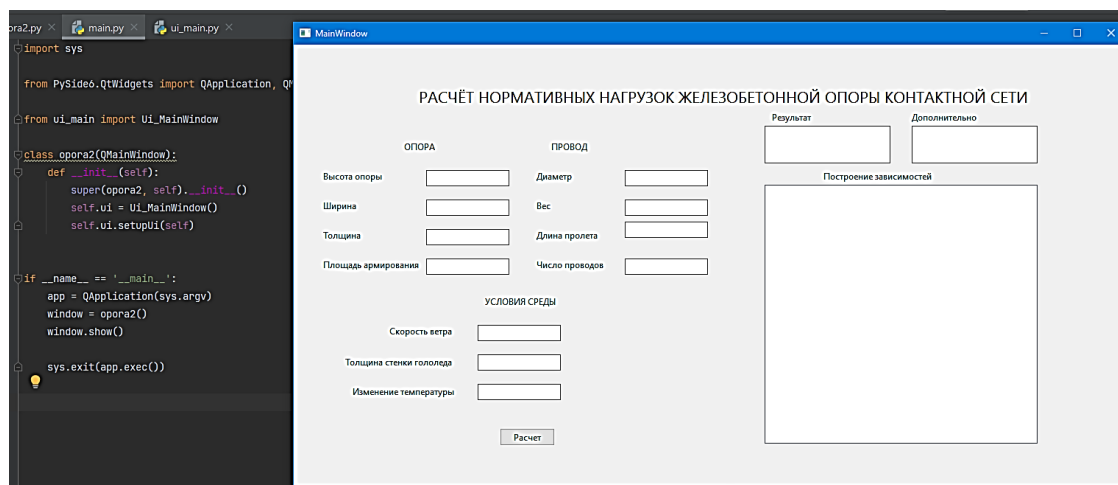


Рис. 2. Визуализация интерфейса программы в Python

```

3 class ConcretePoleCalculator:
4     1 usage
5
6     def calculate_vertical_loads(self):
7         """Расчёт вертикальных нагрузок"""
8         # Собственный вес опоры
9         volume = self.pole['height'] * self.pole['width'] * self.pole['thickness']
10        self.dead_load = volume * self.material['concrete_density'] * self.gravity
11
12        # Вес проводов
13        wire_weight = (self.wire['weight_per_m'] * self.wire['span_length']
14                       * self.wire['num_wires']) * self.gravity
15        return {'dead_load': self.dead_load, 'wire_weight': wire_weight}
16
17    1 usage
18
19    def calculate_wind_loads(self):
20        """Расчёт ветровых нагрузок"""
21        # На опоры
22        q = (self.env['wind_speed']**2) / 1.6
23        cx_pole = 1.4
24        area_pole = self.pole['height'] * self.pole['width']
25        wind_pole = q * cx_pole * area_pole
26
27        # На провода
28        cx_wire = 1.2
29        area_wire = (self.wire['diameter'] * self.wire['span_length']
30                   * self.wire['num_wires'])
31        wind_wire = q * cx_wire * area_wire
32
33        return {'wind_pole': wind_pole, 'wind_wire': wind_wire}
34
35    1 usage
36
37    def calculate_ice_load(self):
38        """Расчёт ледовой нагрузки"""
39        ice_volume = math.pi * self.env['ice_thickness'] * (

```

Рис. 3. Фрагмент кода формирования расчетной части программы в Python

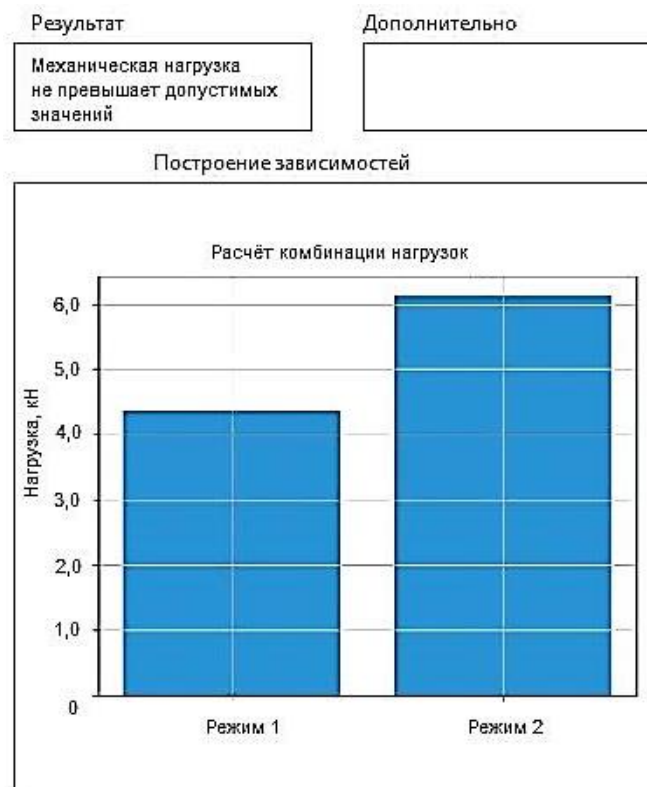


Рис. 4. Результат проведения расчета в программе

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демина Л.С., Ли В.Н., Власенко С.А. Оценка состояния железобетонных опор контактной сети переменного тока. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. 102 с. EDN: RHWDQH.
2. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : [утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 г. № 1047/р (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 19.01.2023 г. № 91/р)].
3. Заруцкая Т.А., Горпинченко И.А. Анализ существующих методов диагностики опор контактной сети // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3(60). С. 8–13. EDN: VLWXXMC.
4. Ли В.Н., Демина Л.С., Власенко С.А. Методика прогнозирования остаточного ресурса опор контактной сети // Транспорт Урала. 2021. № 1(68). С. 93–98.
5. Утеулиев Б.А. Определение остаточного ресурса железобетонных опор воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше // Энергетик. 2017. № 3. С. 13–17.
6. Волковская В.В., Черная А.А., Гулякин Д.В. Современное программное обеспечение для расчетов различных конструкций, используемое строителями // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 73-1. С. 21–24. EDN: DDJHOD. doi:10.18411/lj-05-2021-04
7. Рюхина Н.С., Мазур Е.В., Ибрагимова А.А. Обзор программных комплексов для расчета и проектирования мостовых сооружений // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 2. С. 30.
8. Демина Л.С., Ли В.Н. Модель промежуточной консольной железобетонной опоры контактной сети электрифицированных железных дорог в среде SolidWorks // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 г. Комсомольск-на-Амуре : Изд-во КнАГУ, 2019. С. 97–101. EDN: RUCYLZ.
9. Li V., Demina L., Vlasenko S. Determination of the Current State and Forecast of the Remaining Life of the Catenary Supports of Electrified Railways // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. P. 635–644.
10. Ли В.Н., Власенко С.А., Демина Л.С. Перспективы использования автоматизации процессов дефектирования повреждений в опорах контактной сети // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы IV международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 г. / под ред. С.И. Сухорукова (отв. ред.), А.С. Гудима, Н.Н. Любушкиной. Комсомольск-на-Амуре : Изд-во КнАГУ, 2021. С. 110–113. EDN: ZAYPIN.
11. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1). Москва : АО «Кодекс», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 05.02.2025).
12. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (акт. редакция СНиП 2.01.07-85). Москва : АО «Кодекс», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554402880> (дата обращения: 05.02.2025).

REFERENCES

1. Demina L.S., Lee V.N., Vlasenko S.A. Otsenka sostojaniya zhelezobetonnykh opor kontaktnoj seti peremennogo toka [Assessment of the state of reinforced concrete supports of the alternating current contact network]. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2023. 102 s. EDN: RHWDQH.
2. Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruksij kontaktnoj seti [Instructions for maintenance and repairs of supporting structures of contact network] : [utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» от 18.04.2022 g. № 1047/r (v redaktsii rasporyazheniya ОАО «RZhD» от 19.01.2023 g. № 91/r)].
3. Zarutskaya T.A., Gorpichenko I.A. Analiz sushchestvujushchikh metodov diagnostiki opor kontaktnoj seti [Analysis of the existing methods for diagnosing the supports of the contact network] // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. № 3(60). S. 8–13. EDN: VLWXXMC.
4. Lee V.N., Demina L.S., Vlasenko S.A. Metodika prognozirovaniya ostatocnogo resursa opor kontaktnoj seti [Methodology for predicting the residual life of contact network supports] // Transport Urala. 2021. № 1(68). P. 93–98.
5. Uteuliev B.A. Opredelenie ostatocnogo resursa zhelezobetonnykh opor vozdushnykh linij elektropredachi 110 kV i vyshe [Determination of the residual resource of reinforced concrete supports of overhead power lines of 110 kV and above] // Energetik. 2017. № 3. S. 13–17.
6. Volkovskaya V.V., Chernaya A.A., Gulyakin D.V. Sovremennoye programnoye obespechenie dlya raschetov razlichnykh konstruksij, ispol'zuyemye stroitelyami [Modern software for calculations of various structures, used by builders] // Tendetsii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2021. № 73-1. S. 21–24. EDN: DDJHOD. doi:10.18411/lj-05-2021-04
7. Ryukhina N.S., Mazur E.V., Ibragimova A.A. Obzor programnykh kompleksov dlya rascheta i proektirovaniya mostovykh sooruzhenij [Review of software complexes for calculation and design of bridge structures] // Transportnye sooruzheniya. 2024. T. 11, № 2. S. 30.
8. Demina L.S., Lee V.N. Model' promezhutochnoj konsol'noj zhelezobetonnoj opory kontaktnoj seti elektrificirovannykh zheleznykh dorog v srede SolidWorks [Model of the intermediate console reinforced concrete support of the contact network of electrified railways in SolidWorks environment] // Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Komsomolsk-na-Amure, 14 iyunya 2019 g. Komsomolsk-na-Amure : Izd-vo KnAGU, 2019. S. 97–101. EDN: RUCYLZ.
9. Lee V., Demina L., Vlasenko S. Determination of the Current State and Forecast of the Remaining Life of the Catenary Supports of Electrified Railways // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. P. 635–644.
10. Lee V.N., Vlasenko S.A., Demina L.S. Perspektivy ispol'zovaniya avtomatizatsii processov defektirovaniya povrezhdenij v oporakh kontaktnoj seti [Prospects for the use of automation of the processes of defecting damage in the supports of the contact network] // Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu : materialy IV mezhdunarodnoj nauchno-

prakticheskoy konferentsii. Komsomolsk-na-Amure, 16–26 fevralya 2021 g. / pod red. S.I. Sukhorukova (otv. red.), A.S. Gudima, N.N. Lyubushkinoy. Komsomolsk-na-Amure : Izd-vo KnAGU, 2021. S. 110–113. EDN: ZAYPIN.

11. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. SNiP 52-01-2003 (s izmeneniyem № 1) [SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. SNiP 52-01-2003 (with a change № 1)]. – Moskva : AO «Kodeks», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/554403082> (data obrashcheniya: 05.02.2025).

12. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [SP 20.13330.2016. Loads and Exposure] (act. redaktsiya SNiP 2.01.07-85). Moskva : AO «Kodeks», 2019. URL : <http://docs.cntd.ru/document/5544402880> (data obrashcheniya: 05.02.2025).

Информация об авторах

Л.С. Демина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;

С.А. Власенко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»;

В.Н. Ли – доктор технических наук, профессор, консультант Управления научно-исследовательской деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета;

Ю.Н. Березуцкий – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения».

Information about the authors

L.S. Demina – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems;

S.A. Vlasenko – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems;

V.N. Lee – Doctor of Science (Engineering), professor, Consultant of the Section of Scientific-and-Research Activities of Komsomolsk-na-Amure State University;

Y.N. Berezutsky – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply Systems.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 06.03.2025.

The article was submitted: 07.02.2025; approved after reviewing: 06.03.2025; accepted for publication: 06.03.2025.

Научная статья
УДК 656.21
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-65-73

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА

Ковтун Богдан Анатольевич¹, Муравьева Любовь Геннадьевна²,
Колесникова Марина Геннадьевна³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения – филиал ДВГУПС в г. Южно-Сахалинске

¹ kuzbass-go@yandex.ru

² Lu10-03@yandex.ru

³ kolmar1980@yandex.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния совершенствования объектов железнодорожной инфраструктуры на показатели работы железнодорожного транспорта, в частности, определена динамика и структура грузооборота и объёмы пассажирских перевозок. Кроме того, аргументирована необходимость и показана социально-экономическая значимость реализации проекта возведения объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на участке «станция Селихин (Хабаровский край) – станция Ныш (Сахалинская область)». В частности, проведён сравнительный анализ вариантов транспортировки грузов с использованием имеющейся транспортной инфраструктуры и новой железной дороги с мостовым переходом, представлено распределение инвестиционных затрат по объектам строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта на участке «Селихин–Ныш», определена динамика ежегодного грузооборота, рассчитаны налоговые и неналоговые поступления в бюджеты различных уровней и во внебюджетные фонды, выявлены социальные и экономические эффекты.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортная инфраструктура, объекты железнодорожной инфраструктуры, железнодорожный мостовой переход, грузооборот, пассажирооборот, строительство железнодорожной линии

Original article

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF RAILWAY INFRASTRUCTURE ON THE SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE REGION

Kovtun Bogdan A.¹, Muravyova Lyubov G.², Kolesnikova Marina G.³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Transport University – branch of FESTU in Yuzhno-Sakhalinsk

¹ kuzbass-go@yandex.ru

² Lu10-03@yandex.ru

³ kolmar1980@yandex.ru

Annotation. The authors conducted a study of the impact of improving railway infrastructure on the performance indices of the railway transport and in particular, it determined the dynamics and structure of freight turnover and the volume of passenger traffic. In addition, the necessity is argued and the socio-economic significance is shown of the implementation of the project for the construction of railway transport infrastructure facilities on the section «Selikhin station (Khabarovsk Territory) – Nysh station (Sakhalin region)». In particular, a comparative analysis of options for transporting goods using the existing transport infrastructure and a new railway with a bridge was carried out, the distribution of investment costs per objects of construction projects of railway transport infrastructure on the Selikhin – Nysh section is presented, the dynamics of annual freight turnover are determined, tax and non-tax revenues to budgets of various levels and to extra-budgetary funds are calculated, social and economic effects are identified.

Keywords: railway transport, transport infrastructure, railway infrastructure objects, railway bridge crossing, freight turnover, passenger turnover, construction of a railway line

Динамичное социально-экономическое развитие регионов определяется, в частности, эффективным функционированием транспортной инфраструктуры. При этом особую роль в обеспечении доступности территории играет железнодорожный транспорт.

Развитие железнодорожного транспорта в Сахалинской области во многом связано с перешивкой колеи на общероссийский стандарт 1520 мм, завершившейся в 2020 г. Положительными результатами

модернизации инфраструктуры железнодорожного транспорта являются повышение объёмов и качества перевозок пассажиров и грузов за счет обновления парка подвижного состава, увеличения среднесуточной производительности локомотивов в среднем на 26 % по сравнению с 2018 г., повышения среднего веса поезда более чем на 8 % и снижения практически на 15 % времени простоя вагонов и доставки грузов получателям [1]. Кроме того, улучшение

состояния железнодорожного полотна способствовало повышению скорости поездов и безопасности перевозочного процесса.

Совершенствование инфраструктуры отразилось на показателях работы железнодорожного транспорта в период с 2018 по 2023 г. (рис. 1).

На основе представленных данных можно заключить, что объем перевезённых грузов железнодорожным транспортом возрос на 66,4 % в 2023 г. по сравнению с 2018 г. Также констатируется положительная динамика эксплуатационного грузооборота, отражающего работу подвижного состава по перемещению груза с учётом фактического расстояния. Так, данный показатель за исследуемый период увеличился на 40,5 %. Примечательно, что структура перевозимой продукции в течение 2018–2023 гг. изменилась незначительно, сохранив преобладание определённых номенклатурных групп (рис. 2).

Наибольший удельный вес в структуре перевозимой железнодорожным транспортом продукции занимает каменный уголь. При этом его доля

в 2018 г. составляла 69,9 % и к 2023 г. повысилась до 81,9 %. Также продолжают удерживать существенные позиции в структуре грузооборота строительные материалы, машины и механизмы, удельный вес которых в 2018 г. достиг отметки 18,6 %, а в 2023 г. сократился до 11,8 %, оставляя за собой второе место по объёмам перевозки.

Однако отрицательная динамика доли грузов, в общей массе перемещаемых железнодорожным транспортом, выявлена по таким товарным группам, как нефть и нефтепродукты, а также чёрные металлы.

Одним из значимых показателей функционирования железнодорожного транспорта является объем пассажирских перевозок. В течение всего периода исследования наблюдается неоднозначная динамика количества пассажиров железнодорожного транспорта по маршруту дальнего следования в Сахалинской области. Несмотря на постепенное увеличение числа перемещающихся по железной дороге, достигнутое в 2023 г. значение 319 тыс. чел. ниже на 14 % уровня 2018 г. (рис. 3).



Рис. 1. Динамика основных показателей перевозки грузов железнодорожным транспортом Сахалинской области в период с 2018 по 2023 г. (составлено по [1, 2]):

■ — отправлено грузов, т; — эксплуатационный грузооборот, тыс. т·км нетто

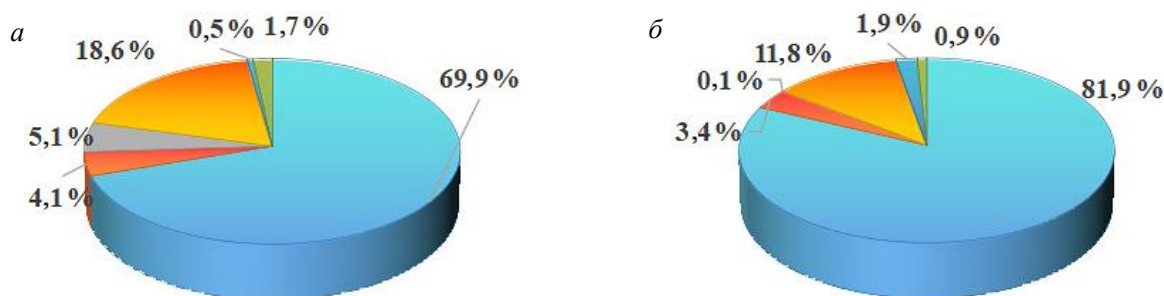


Рис. 2. Структура грузов, перевозимых железнодорожным транспортом Сахалинской области: а — 2018 г.; б — 2023 г.; ■ — каменный уголь; ■ — нефть и нефтепродукты; ■ — чёрные металлы; ■ — строительные грузы; ■ — цемент; ■ — прочие группы грузов (составлено по [1, 2])

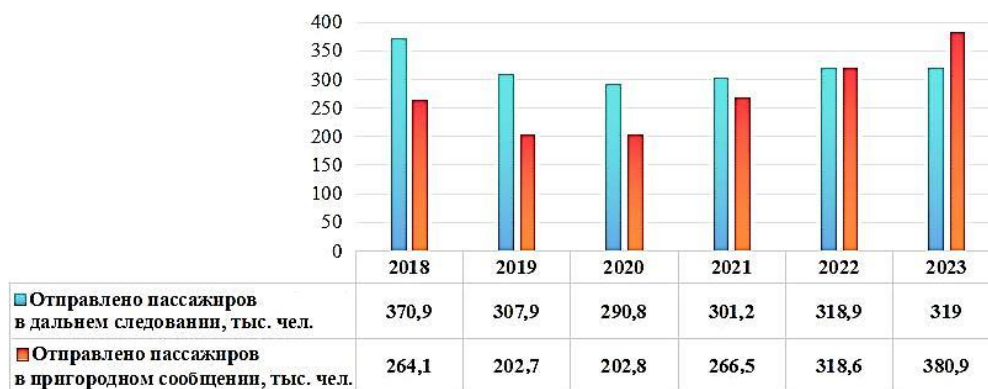


Рис. 3. Динамика количества пассажиров железнодорожного транспорта по маршруту дальнего следования и в пределах пригородного сообщения (составлено по [1, 2])

Существенное увеличение количества перевезённых пассажиров наблюдается в пригородном сообщении. Так, в период с 2018 по 2023 гг. прирост числа воспользовавшихся железнодорожным транспортом составил 44,2 %. Существенное влияние на приращение показателя перевозки пассажиров оказал ввод в эксплуатацию рельсовых автобусов РА-3 «Орлан», функционирующих по 8 маршрутам.

Показатель пассажирооборота по направлениям следования, отражающий перевозку пассажиров с учётом расстояний, демонстрирует положительную динамику по маршрутам пригородного сообщения. Так, в течение исследуемого периода пассажирооборот возрос на 16,8 млн пасс.-км. Однако данный показатель имеет разнонаправленную динамику по маршрутам дальнего следования, где выявлено существенное его снижение в 2019–2020 гг. и стремительный рост с 2021 г. по 2023 г. (рис. 4).

Сдерживающим фактором наращивания объёмов пассажирских перевозок по маршрутам дальнего следования является конкуренция со стороны автомобильного и воздушного транспорта, усиливающаяся ввиду строительства новых и модернизации существующих инфраструктурных объектов (капитальный ремонт дорог, приобретение новых автобусов, возведение нового аэровокзала, реконструкция аэродромов, обустройство посадочных площадок и др.).

Таким образом, модернизация инфраструктуры железнодорожного транспорта положительно отразилась на показателях функционирования железной дороги. Однако дальнейшее развитие отрасли связано со строительством новых инфраструктурных объектов, в частности, с возведением железнодорожной линии «ст. Селихин (Хабаровский край) – ст. Ныш (Сахалинская область)» и сооружением мостового перехода, соединяющего материковую часть России с о. Сахалин.

Необходимость возведения данного объекта железнодорожного транспорта продиктована потребностью в повышении транспортной доступности островного региона, поскольку реальные возможности паромной переправы «Ванино–Холмск» не обеспечивают в полной мере стабильную транспортную связь и не способствуют удовлетворению потребностей экономики о. Сахалин в грузоперевозках и реализации крупномасштабных проектов развития Сахалинской области. Социально-экономическая значимость проекта проявляется, прежде всего, в сокращении времени перевозки грузов в сообщении «материковая часть России – о. Сахалин».

В табл. 1 представлена сравнительная характеристика времени доставки грузов по маршруту «Комсомольск-на-Амуре – Южно-Сахалинск» в рамках двух вариантов транспортировки.



Рис. 4. Динамика пассажирооборота по направлениям следования в Сахалинской области за период 2018 – 2023 гг., млн пасс.-км:

■ – пригородное сообщение; ■ – дальнего следования (составлено по [1, 2])

Таблица 1

**Сравнительная характеристика времени доставки грузов
по двум вариантам транспортировки**

Участок	Транспортировка грузов в сообщении Комсомольск-на-Амуре–Южно-Сахалинск			
	Вариант 1: использование паромной переправы		Вариант 2: использование новой железнодорожной линии «Селихин–Ныш»	
	Расстояние, км	Время, сут	Расстояние, км	Время, сут
Комсомольск-на-Амуре–Селихин	71	0,1	71	0,1
Селихин–Ванино	368	0,6	0	0
Селихин–Ныш	0	0	585	0,9
Холмск–Ильинское–Южно-Сахалинск	267	0,4	0	0
Ныш–Южно-Сахалинск	0	0	569	0,8
Паромная переправа Ванино–Холмск	260	0,9	0	0
Дополнительное время в связи с отсутствием паромного сообщения «материк – о. Сахалин» по погодным условиям и неудовлетворительным техническим состоянием паромов	0	2-3	0	0
ИТОГО	966,0	4-5	1 225,0	1,8

На основе анализа данных табл. 1, с использованием первого варианта транспортировки через паромную переправу, расстояние составит 966 км, при этом время нахождения груза в пути – около 4-5 сут (в расчётах принято среднее значение участковой скорости движения грузовых поездов по ДВОСТЖД – 29,3 км/ч). Однако перемещение грузов по новой железнодорожной линии «Селихин–Ныш» позволит преодолеть расстояние 1225 км намного быстрее (за 1,8 сут).

В целях определения эффективности и целесообразности инвестиционного проекта «Строительство железнодорожной линии "Селихин–Ныш" с мостовым переходом через пролив Невельского» необходимо оценить предполагаемые инвестиционные затраты на каждом этапе реализации проекта, выявить возможные объёмы грузовых перевозок по основным маршрутам, определить средний уровень цен и тарифов на услуги железнодорожного транспорта, а также рассчитать расходы по техническому обслуживанию объектов инфраструктуры.

В течение 10 лет экспертами и инженерами-сметчиками предпринимались попытки определить инвестиционные затраты на возведение железной дороги, соединяющей посредством моста материковую часть России с островом Сахалин. Динамика стоимости проекта с учётом инфляционной составляющей представлена на рис. 5.

Так, совокупные инвестиционные затраты на реализацию проекта могут составить 815,2 млрд руб. в ценах IV квартала 2023 г., в том числе стоимость про-

ектно-изыскательских работ превысит 27 млрд руб., а капитальные вложения в создание объектов основных средств достигнут величины в 787,8 млрд руб.

Реализация проекта сооружения железнодорожной линии «ст. Селихин – ст. Ныш» с мостовым переходом, соединяющим мыс Лазарева и мыс Погиби, предполагает на первом этапе (2025–2027) проведение проектно-изыскательских работ, включающих в себя актуализацию эскизного проекта и специальных технических условий (СТУ), разработку проектной, рабочей документации и Главгосэкспертизу. Стоимость работ по проектированию занимает 3,4 % от общего бюджета проекта. Наибольший удельный вес в совокупных инвестиционных затратах принадлежит вложениям в строительно-монтажные работы (96,6 %).

В случае завершения процесса проектирования, в частности, получения положительного заключения Главгосэкспертизы, к 2027 г., начнётся второй этап реализации проекта – выполнение строительно-монтажных работ, т.е. возведение инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта в течение 7 лет (до 2033 г.) (рис. 6).

На основе представленных данных можно заключить, что наибольшие затраты на выполнение строительно-монтажных работ предстоит понести на третьем–пятом году возведения инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта. При этом в рамках проекта планируется построить три крупномасштабных объекта, распределение инвестиционных затрат по которым представлено на рис. 7.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА



Рис. 5. Динамика предполагаемой стоимости проекта строительства железнодорожной линии «ст. Селихин (Хабаровский край) – ст. Ныш (Сахалинская область)» с мостовым переходом через пролив Невельского с учётом инфляционной составляющей, млрд руб. с НДС (составлено и рассчитано по [1, 3])

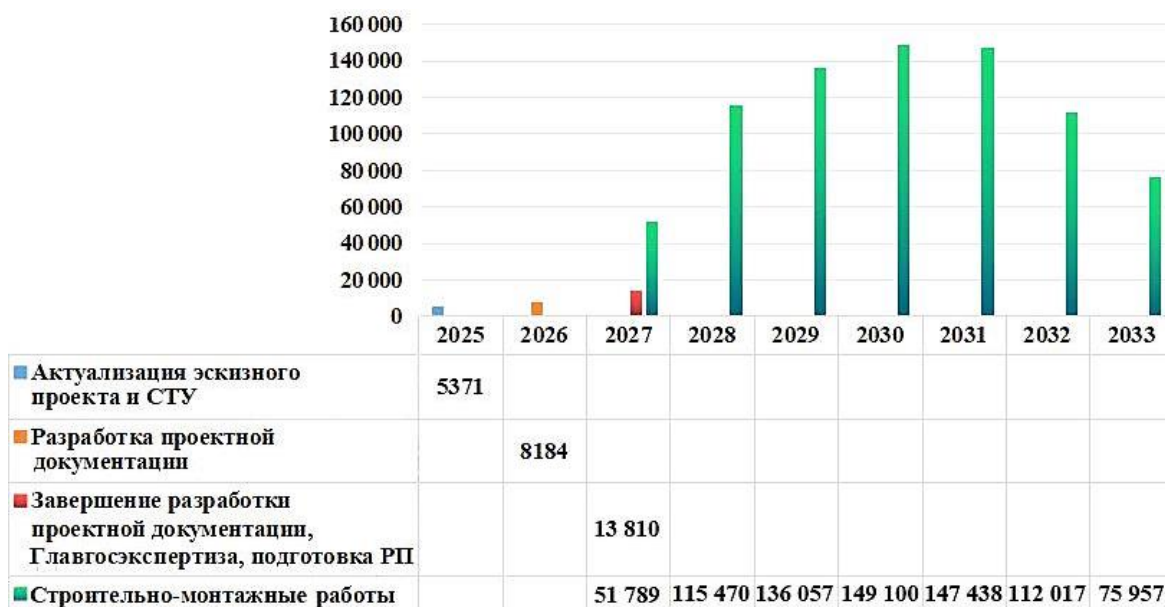


Рис. 6. Распределение инвестиций по этапам реализации проекта по созданию объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» в период с 2025 до 2033 г., млн руб. с НДС (составлено и рассчитано по [1, 3])

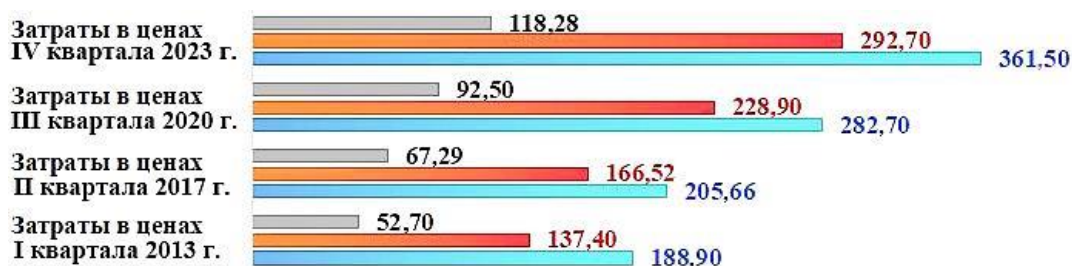


Рис. 7. Предполагаемое распределение капитальных вложений по объектам строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта на участке «Селихин – Ныш», млрд. руб. (с НДС): ■ – железнодорожная линия мост на о. Сахалин – с. Ныш в Ноглинском городском округе Сахалинской области, протяжённостью 125 км; ■ – железнодорожная линия Селихин (БАМ) – мост на о. Сахалин, протяжённостью 451 км; ■ – мост через пролив Невельского на о. Сахалин, протяжённостью 9 км

Согласно данным рис. 7 наибольший объем инвестиций потребуется на возведение моста через пролив Невельского на о. Сахалин протяженностью 9 км.

В связи с ежегодным удорожанием строительных материалов, логистических процессов, топлива и комплектующих для обеспечения работы строительных машин и механизмов, стоимость строительства 1 км железнодорожной линии поступательно повышается. Дальнейший перенос сроков проектирования и строительства объектов железнодорожного транспорта на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» приведет к существенному удорожанию проекта, проблемам с финансированием, что отразится на длительности выполнения строительно-монтажных работ.

По прогнозным оценкам строительство и эксплуатация инфраструктуры железнодорожного транспорта на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» позволит увеличить грузооборот между Сахалинской областью и Хабаровским краем. В табл. 2 представлена динамика грузооборота в рамках горизонта планирования.

Таблица 2

**Планируемый ежегодный грузооборот
в рамках реализации проекта по возведению
железнодорожной инфраструктуры на участке
«ст. Селихин – ст. Ныш», млн т**

Грузовые потоки	Значение показателя
С 2034 г. по 2036 г. грузооборот ежегодно, в том числе:	8,5
материк–Сахалин	3,0
Сахалин–материк	5,5
С 2037 по 2080 г. грузооборот ежегодно, в том числе:	9,2
материк–Сахалин	3,3
Сахалин–материк	5,9

Строительство железнодорожной линии, соединяющей о. Сахалин с материковой частью России посредством мостового перехода, предполагает переключение значительной части грузовых потоков с паромной переправы «Ванино–Холмск», что будет способствовать увеличению грузооборота до 9,2 млн т в год.

Так как наибольший удельный вес в структуре грузов, перевозимых железной дорогой по территории Сахалинской области, составляют каменный уголь, строительные грузы, нефть и нефтепродукты, а также цемент, очевидно, что основной грузооборот в направлении «Сахалин–материк» по новой железнодорожной линии будет представлен преимущественно данными номенклатурными группами. В связи с этим возведение объектов железнодорожной инфраструктуры на участке «Селихин–Ныш» отразится в большей степени на развитии указанных отраслей промышленности островной области (табл. 3).

Исходя из прогнозного ежегодного грузооборота на стадии эксплуатации новой железнодорожной инфраструктуры на участке «ст. Селихин – ст. Ныш», можно рассчитать прирост объемов добычи и перевозки грузов по основным номенклатурным группам по направлению «Сахалин–материк». Так, объем перевозки каменного угля в первые пять лет функционирования новой инфраструктуры железнодорожного транспорта может ежегодно составлять около 5 млн т, что на 3,7 млн т больше ежегодного грузооборота 2023 г. Также существенно увеличатся объемы перевозки строительных грузов, нефти, нефтепродуктов и цемента.

Таблица 3

**Анализ влияния строительства объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта
на участке «Селихин–Ныш» по направлению «Сахалин–материк» на грузооборот и количество
занятых в добывающих производствах и в сфере энергоснабжения в Сахалинской области**

Показатели	2023 г.	На стадии эксплуатации новой железнодорожной инфраструктуры на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» по направлению «Сахалин–материк» (из расчета ежегодного значения показателя)		Абсолютное отклонение (+; –) (ст. 3 – ст. 2)	Абсолютное отклонение (+; –) (ст. 4 – ст. 2)
		с 2034 по 2036 гг.	с 2037 по 2080 гг.		
Грузооборот в год, млн т	1,555	5,451	5,900	3,897	4,345
Объемы перевозки по основным номенклатурным группам, млн т, в том числе	1,544	5,413	5,858	3,869	4,315
объем добычи и перевозки каменного угля	1,321	4,631	5,013	3,311	3,692
объем перевозки строительных грузов	0,136	0,476	0,515	0,340	0,380
объем перевозки нефти и нефтепродуктов	0,055	0,195	0,211	0,139	0,155
объем перевозки цемента	0,031	0,110	0,119	0,079	0,088
Количество занятых в добывающих производствах и в сфере обеспечения электрической энергией, чел., в том числе:	17042	46 759	50 610	29 717	33 568
добыча полезных ископаемых	9628	33 761	36 541	24 133	26 913
обеспечение электрической энергией	7414	12 999	14 069	5585	6655

Примечание – Рассчитано по [1, 2].

Потенциальной возможностью существенного повышения объёмов грузоперевозок является выход сахалинских грузов через сеть железных дорог Дальневосточного федерального округа, в частности, через Транссибирскую магистраль на государственную железную дорогу Китайской Народной Республики. Это позволит в дальнейшем наращивать объёмы добычи и переработки природных ресурсов, производства готовой продукции экспортной направленности.

Функционирование новой инфраструктуры железнодорожного транспорта обеспечит существенный прирост ВРП Сахалинской области (рис. 8).

Так, в течение первых десяти лет использования инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» прирост ВРП Сахалинской области по прогнозным расчетам составит 248,3 млрд руб. В период с 2024 по 2055 г. (простой срок окупаемости проекта) приращение ВРП островной области достигнет 550,4 млрд руб.

Повышение объёмов добычи и переработки природных ресурсов, а также увеличение производства

электрической энергии для обеспечения объектов железнодорожной инфраструктуры будут способствовать увеличению числа новых рабочих мест. В частности, прирост численности работников в сфере добычи полезных ископаемых составит более 24 тыс. чел. к 2036 г., и далее количество занятых может быть увеличено до 36,5 тыс. чел., а в сфере обеспечения электрической энергией численность работников может возрасти на 5,6 тыс. чел. к 2036 г. с последующим ростом на 6,7 тыс. чел.

Таким образом, создание объектов железнодорожной инфраструктуры на территории Сахалинской области будет стимулировать развитие добывающих отраслей, сферы обеспечения электрической энергией, других производств и позволит создать новые рабочие места в количестве свыше 33,6 тыс. чел.

Социально-экономическая значимость проекта проявляется также в повышении налоговых и неналоговых поступлений в бюджеты различных уровней и во внебюджетные фонды (табл. 4).

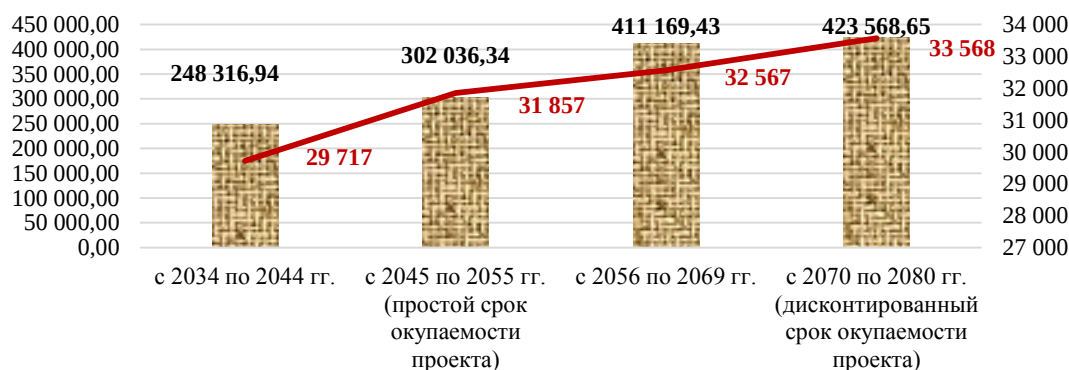


Рис. 8. Прирост ВРП Сахалинской области и динамика количества создаваемых рабочих мест в результате функционирования новой железнодорожной инфраструктуры на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» в рамках горизонта планирования: – ВРП Сахалинской области, млн руб.; – новые рабочие места, чел.

Таблица 4

**Налоговые и неналоговые поступления в бюджеты различных уровней
и во внебюджетные фонды в результате возведения железнодорожной инфраструктуры
на участке «ст. Селихин – ст. Ныш» в рамках горизонта планирования, млн руб.**

Виды поступлений	Налоговые и неналоговые поступления	
	до 2055 г. (простой срок окупаемости проекта)	до 2080 г. (дисконтированный срок окупаемости проекта)
Поступление налогов по уровням бюджетной системы Российской Федерации, в том числе:	363 405	1 268 890
Федеральный бюджет	164 574	454 326
НДС	132 889	323 501
Налог на прибыль	31 685	130 825
Областной бюджет	195 939	809 182
Налог на прибыль	179 549	778 684
НДФЛ	16 390	30 498
Местный бюджет	2 892	5 382
НДФЛ	2 892	5 382
Поступление страховых взносов во внебюджетные фонды, в том числе:	53 013	98 929
Социальный фонд России (СФР)	44 263	82 601
Федеральный фонд обязательного медицинского страхования	8 750	16 328

Существенный прирост поступлений в бюджеты различных уровней и во внебюджетные фонды связан, прежде всего, с мультипликативным воздействием создаваемого объекта железнодорожной инфраструктуры на все смежные отрасли экономики и сферы экономической деятельности не только Дальнего Востока, но и страны в целом, посредством значительного увеличения ВРП Сахалинской области и Хабаровского края и ВВП Российской Федерации.

Основными субъектами, способными обеспечить прирост ВВП и налоговых поступлений, являются следующие:

- ОАО «РЖД» и операторы грузовых железнодорожных перевозок;
- поставщики материально-технических ресурсов, подрядчики, предприятия, предоставляющие транспортные услуги на инвестиционной и эксплуатационной стадиях реализации проекта строительства объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта;
- потребители услуг – производители продукции, перевозимой железнодорожным транспортом;
- работники предприятий, задействованные в процессе строительства и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры посредством приложения своего труда (ФОТ).

Таким образом, социально-экономическая значимость проекта возведения железнодорожной линии «Селихин–Ныш» с мостовым переходом через пролив Невельского проявляется, прежде всего, в следующих аспектах:

- ✓ интеграции железнодорожной инфраструктуры Сахалинской области в единую транспортную сеть страны;
- ✓ обеспечении круглогодичного сообщения о. Сахалин с материком при сокращении времени доставки грузов в условиях повышенной надёжности транспортного сообщения;
- ✓ снижении стоимости транспортировки продукции в сообщениях между Сахалином и остальными регионами Российской Федерации;

✓ обеспечении транспортной доступности слабо освоенных районов Сахалина и северо-востока Хабаровского края, обладающих большим потенциалом природных ресурсов;

✓ создании новых рабочих мест в различных отраслях промышленности островной области и Хабаровского края, что будет способствовать улучшению уровня и качества жизни населения, повышению его транспортной подвижности, закреплению населения и преодолению негативных демографических тенденций на указанных территориях;

✓ повышении инвестиционной привлекательности крупных проектов на территории Сахалинской области и Хабаровского края в области добычи и переработки нефти и газа, электроэнергетики, развития угольной промышленности, освоения и переработки морских биоресурсов, развития сельского хозяйства, туризма, сферы социальных услуг и т.д.;

✓ создании благоприятной конъюнктуры для организации новых производств по добыче и переработке природных ресурсов, выпуску готовой продукции в связи с улучшением условий выхода на «материковые» рынки;

✓ повышении доходов в бюджеты всех уровней за счет развития отраслей промышленности и сфер экономической деятельности;

✓ повышении мобилизационной готовности и безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Реализация проекта по строительству железнодорожной линии «ст. Селихин (Хабаровский край) – ст. Ныш (Сахалинская область)» с возведением мостового перехода, соединяющего мыс Лазарева и мыс Погиби, рассматривается в рамках стратегии развития Восточного полигона, сети железных дорог в Дальневосточном федеральном округе. Социально-экономическая и геополитическая значимость строительства новых инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта проявляется в тесной связи с общероссийскими стратегическими ориентирами: развитие Дальнего Востока и формирование внешнеэкономических связей со странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Министерство транспорта и дорожного хозяйства Сахалинской области : офиц. сайт. URL : <https://mintrans.sakhalin.gov.ru/> (дата обращения: 20.10.2024).
2. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Сахалинской области (Сахалинстат) : офиц. сайт. URL : <http://www.sakhalinstat.gks.ru> (дата обращения: 20.10.2024).
3. Васина Н.В., Цой Сун Ок. Перспективы строительства моста «Сахалин–материк» // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1, № 1. С. 32–35.
4. Асаул М.А., Мохов А.Е. Железнодорожный переход на Сахалин: мост или туннель? // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 3(82). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/zheleznodorozhnyy-perehod-na-sahalin-most-ili-tunnel> (дата обращения: 20.10.2024).

REFERENCES

1. Ministerstvo transporta i dorozhnogo khozyajstva Sakhalinskoj oblasti [the Ministry of Transport and Road Facilities of the Sakhalin Region] : ofits. sajт. URL: <https://mintrans.sakhalin.gov.ru/> (data obrashcheniya 20.10.2024).
2. Territorial'nyj organ Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Sakhalinskoj oblasti (Sakhalinstat) [the Territorial Body of the Federal State Statistics Service for the Sakhalin Region (Sakhalinstat)] : ofits. sajт. URL: <http://www.sakhalinstat.gks.ru> (data obrashcheniya 20.10.2024)
3. Vasina N.V., Tsoi Sun Ok. Perspektivy stroitel'stva mosta "Sakhalin – materik" [Prospects for the construction of the Sakhalin-mainland bridge] // Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. 2019. T. 1, № 1. P. 32–35.
4. Asaul M.A., Mokhov A.E. Zheleznodorozhnyj perekhod na Sakhalin: most ili tunnel'? [Railroad crossing to Sakhalin: bridge or tunnel?] // Transport Rossijskoj Federatsii. 2019. № 3(82). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zheleznodorozhnyy-perekhod-na-sakhalin-most-ili-tunnel> (data obrashcheniya 20.10.2024).

Информация об авторах

Б.А. Ковтун – доктор экономических наук, доцент, директор СахИЖТ – филиала ДВГУПС в г. Южно-Сахалинске;
Л.Г. Муравьева – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Финансы и бухгалтерский учёт»;
М.Г. Колесникова – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Финансы и бухгалтерский учёт»;

Information about the authors

B.A. Kovtun – Doctor of Science (Economics), Associate Professor, Director of SakhIZhT – branch of the Far East State Transport University in Yuzhno-Sakhalinsk;
L.G. Muravyova – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Finance and Accounting;
M.G. Kolesnikova – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Finance and Accounting.

Статья поступила в редакцию 09.12.2024; одобрена после рецензирования 23.01.2025; принята к публикации 23.01.2025.
The article was submitted: 09.12.2024; approved after reviewing: 23.01.2025; accepted for publication: 23.01.2025

Научная статья
УДК 624.131.431.3
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-74-78

ИЗЫСКАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ И СООРУЖЕНИЙ ИННОВАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Коломиец Виктор Степанович¹, Шемякин Вячеслав Юрьевич², Кудрявцев Сергей Анатольевич³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
Автор, ответственный за переписку: Кудрявцев Сергей Анатольевич, kudr@festu.khv.ru

Аннотация. Рассматриваются результаты проектирования железных дорог картографической основой определенного масштаба. Её подготовка – это основная составляющая в процессе проектирования с точки зрения трудозатрат. Современные исследования в данной сфере подтверждают, что в настоящее время наиболее перспективным направлением получения координатной основы являются системы воздушного лазерного сканирования. Автоматизация процессов мониторинга мостов позволяет сократить количество периодических осмотров, поднять на качественно новый уровень выявление неисправностей и оценку технического состояния искусственных сооружений.

Ключевые слова: лазерное сканирование, беспилотные летательные аппараты, цифровая информационная модель ситуации, глобальная навигационная спутниковая система, мосты, мониторинг

Original article

SURVEYS, DESIGN AND MONITORING OF RAILWAY TRACKS AND STRUCTURES USING INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Kolomiets Viktor S.¹, Shemyakin Vyacheslav Y.², Kudryavtsev Sergey A.³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
Corresponding author: Kudryavtsev Sergey Anatolyevich, kudr@festu.khv.ru

Abstract. The article considers the results of designing railways with a cartographic basis of a certain scale. Its preparation is the main component in the design process in terms of labor costs. Modern research in this area confirms that at present the most promising direction for obtaining a coordinate basis is airborne laser scanning systems. Automation of bridge monitoring processes allows reducing periodic inspections, raising to a qualitatively new level the detection of faults and assessment of the technical condition of artificial structures.

Keywords: laser scanning, unmanned aerial vehicles, digital information model of the situation, global navigation satellite system, bridges, monitoring

Введение

Проектирование железных дорог является трудоемким процессом, поскольку для разработки проекта требуется применение навыков и знаний в широких областях технических наук. Уровень требований к проектированию и строительству железных дорог, в том числе и срокам, повышается с каждым годом, так как они должны быть безопасными и возводиться максимально быстро. Все возможные передовые технологии и научные разработки находят своё отражение в железнодорожной инфраструктуре, поэтому создание технологий, направленных на повышение качества и сокращение сроков проектирования железных дорог, является актуальной задачей.

Изыскания и проектирование железнодорожного пути воздушного лазерного сканирования

Основная составляющая в процессе проектирования с точки зрения трудозатрат – это картографическая основа. Имеющийся опыт проектирова-

ния и современные исследования в данной сфере подтверждают, что в настоящее время наиболее перспективным направлением получения координатной основы являются системы воздушного лазерного сканирования. Однако их эффективное применение связано с решением ряда технических и организационных задач.

Благодаря развитию технических средств современное дистанционное исследование способно обеспечивать различные научные и производственные комплексы достаточным набором данных об объектах местности, инженерных сооружениях и рельефе. Такая информация необходима для решения разнообразных инженерных задач, а также для автоматизации при управлении территориями на основе трехмерного геоинформационного обеспечения.

С учетом специфики протяженных линейных объектов (трассы трубопроводов, автомобильные дороги, объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта) среди всех методов съемки преимуще-

ство получают методы, основанные на использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Найденные в результате данные требуют использования специализированных методов их хранения, передачи, обработки и пространственного анализа, в первую очередь в связи с их большими объемами. На этапе экспериментальных исследований выполняется реализация разработанных методов и технологии формирования цифровой информационной модели по результатам инженерно-геодезических изысканий на реальном объекте, включенном в программу модернизации Восточного полигона. Теоретические исследования проводятся на построении алгоритмов позиционирования элементов информационной модели верхнего строения пути, позволяющего точно определять положение и угол поворота объектов ситуации цифровой информационной модели относительно оси железнодорожного пути [1, 2].

Технологические методы, технические и программные средства, используемые в инженерных изысканиях, создадут предпосылки к повышению качества исходных данных и применению технологии информационного моделирования в проектировании объектов строительства и реконструкции железнодорожной инфраструктуры, а также к разработке предложений по автоматизации процесса камеральной обработки результатов полевых работ на основе результатов проведенных исследований.

Полевой эксперимент, выполненный на объекте «Реконструкция ст. Ядрин Дальневосточной железной дороги», позволяет определить точность данных ЦИММ/ЦИМС (цифровой информационной модели местности/ цифровой информационной модели ситуации), полученных посредством воздушного лазерного сканирования, в сравнении с данными наземной съемки с использованием ГНСС (глобальная навига-

ционная спутниковая система), представляющей собой комплекс космических, наземных и пользовательских технических средств, предназначенных для определения местоположения, скорости движения и времени пребывания различных объектов на земной поверхности, в воздушном и морском пространствах. Произведено сравнение данных двух моделей в пяти произвольно выбранных местах. Анализ полученной информации позволяет сделать вывод, что отклонения по данным воздушного лазерного сканирования меняются как в большую, так и в меньшую сторону на величину от 0,22 до 0,02 м, что соответствует сведениям исследований других авторов. В результате проведенного эксперимента установлены сводные требования к объему и точности показателей и требуемый стек технологий съемки местности.

Учитывая, что требованиям, предъявляемым к исходным данным для проектирования, соответствуют лишь сведения наземной съемки, производимые с использованием ГНСС-оборудования, соискателем предложено следующее.

1. В качестве основы ЦИММ/ЦИМС использовать цифровую информационную модель, построенную по результатам воздушного лазерного сканирования, но она в полной мере не удовлетворяет необходимой точности.

2. Для достижения требуемой точности указанную модель дополнить данными, найденными посредством обработки облака точек наземной съемки с использованием ГНСС-оборудования.

ЦИМС содержит строительные конструкции, здания, сооружения, инженерные системы и сети, прочие объекты, находящиеся в границах участка проектирования, не включенные в состав ЦМР. На рис. 1 представлен результат совмещения ЦМР (цифровой модели рельефа) и ЦМЖС (цифровой модели железнодорожной станции).

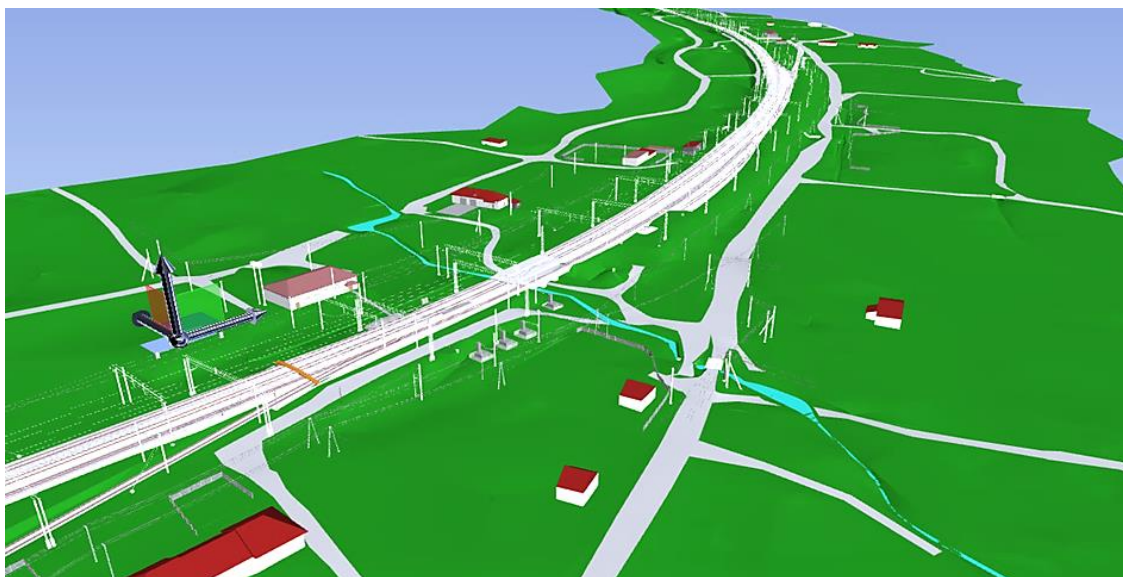


Рис. 1. Фрагмент совмещения ЦМР и ЦМЖС железнодорожной станции

В предлагаемой технологии процесс совмещения поверхностей представляет собой врезку модели верхнего строения пути, снятой координатным способом, имеющим требуемую точность, в модель земляного полотна, полученной путем обработки данных воздушного лазерного сканирования. Операция врезки одной поверхности включает следующий набор задач.

1. Определение границ врезаемой поверхности. В нашем случае, это границы модели поверхности, построенной по результатам наземной съемки с использованием ГНСС или аналогичного ему оборудования (поверхность А).

2. Проекция границы врезаемой поверхности на поверхность, полученной посредством обработки облака точек воздушного лазерного сканирования (поверхность Б).

3. Разделение поверхности Б по проекции границы врезаемой поверхности А.

4. Удаление части поверхности Б, лежащей внутри проекции границы врезаемой поверхности А.

5. Совмещение поверхностей А и Б (рис. 2).

Необходима автоматизация процессов мониторинга мостов в целях сокращения длительности периодических осмотров, уменьшения влияния «человеческого фактора» и подъема на качественно новый уровень выявления неисправностей и оценки технического состояния искусственных сооружений [3]. С этой целью сформирована и внедряется на ОАО «РЖД» инновационная концепция осмотров при текущем содержании искусственных сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (рис. 3).

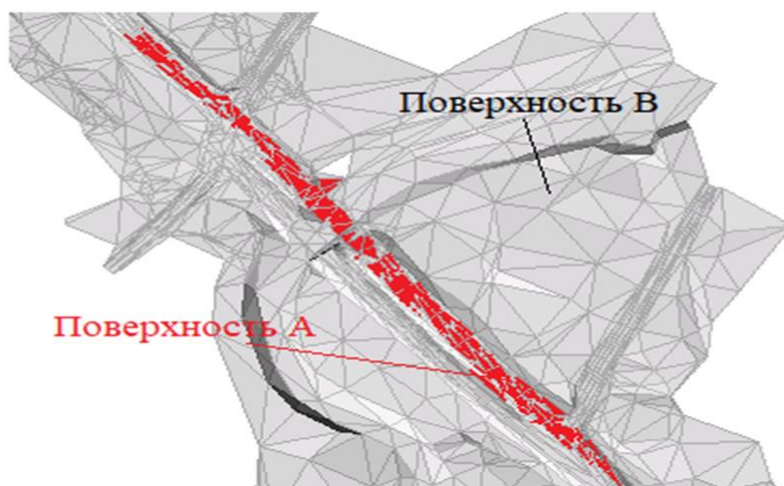


Рис. 2. Результат совмещения двух поверхностей



Рис. 3. Текущее содержание искусственных сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов

Инновационная концепция предусматривает постепенный переход от натурных осмотров к осмотрам с помощью FPV-дронов, управляемых оператором БПЛА с видеокамерой, передающей изображение в режиме реального времени. Такие дроны способны подлетать практически вплотную к сооружениям и демонстрировать оператору труднодоступные для мастеров и бригадиров моста. Запланировано также создание цифровой базы неисправностей, выявляемых по результатам осмотров, и программы обработки данных с помощью технического зрения и нейросетевых баз с автоматическим определением неисправностей. На данном этапе внедрения концепции дистанции инженерных сооружений нарабатывают базы данных осматриваемых сооружений при помощи БПЛА модели DJI Phantom 4 RTK. В целях контроля дистанции инженерных сооружений также успешно проводят осмотры строящихся искусственных сооружений, что позволяет вовремя принять меры при обнаружении недоделок или изъянов строительства.

Современные системы мониторинга – это не только датчики, а сложные системы автоматизации, участвующие при необходимости в управлении процессами. Системы могут быть автономными или являться одной из подсистем более глобальных систем. Мониторинг – важный и ответственный сегмент современных технологий, но с рядом организационных ограничений, связанных с продолжающимся процессом технологической и цифровой эволюции [4–6].

Однако в настоящее время нигде в нормативах не утверждены ясные требования к проектированию систем мониторинга, других вспомогательных систем и подсистем автоматизации, которые определили бы необходимое и достаточное количество датчиков и иных параметров контроля. Необходимо активное участие и объединение усилий научных и коммерческих структур в развитии направления.

Заключение

В связи с перспективами дальнейшего роста и развития сегмента мониторинга железных дорог встают основные задачи отрасли:

- чётко обозначить важность систем мониторинга и задать вектор их развития и применения;
- создать единые требования (стандарты) к применяемым технологическим решениям и уровням их организации, безопасности и к самим принципам их организации;
- определить модели поведения эксплуатирующих организаций в рамках анализа данных, получаемых от систем мониторинга;
- определить спектр основных существующих технических решений, а также поставить необходимые задачи перед участниками рабочей группы по исследованию и разработке новых решений;
- установить роль участия в ходе эксплуатации систем и объектов научных и проектных организаций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коломиец В.С., Кудрявцев С.А. Методические аспекты цифровых моделей геологического строения линейных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта методом обратного моделирования // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 3. С. 19–23.
2. Коломиец В.С., Кудрявцев С.А., Балалаев М.А. Современные тенденции нормативной базы информационного моделирования объектов железнодорожной инфраструктуры России // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 2. С. 27–32.
3. Шемякин В.Ю., Космачева А.А. FPV-эффективность: осмотры искусственных сооружений с помощью инновационных технических средств // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 11–12.
4. Применение информационных моделей искусственных сооружений для мониторинга и прогноза безопасной эксплуатации в криолитозоне / А.А. Петерс, Т.Ю. Вальцева, И.В. Шестаков, С.А. Кудрявцев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4(71). С. 15–26.
5. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «TERMOGROUND» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
6. 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. Vol. 49. Pp. 19–24. (Lecture Notes in Civil Engineering).

REFERENCES

1. Kolomiets V.S., Kudryavtsev S.A. Metodicheskie aspekty tsifrovyykh modelej geologicheskogo stryeniya lineynykh obyektoy infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta metodom obratnogo modelirovaniya [Methodology aspects of digital models of geological composition of linear objects of railway transport's infrastructure by the reverse modeling method] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 3. S. 19–23.
2. Kolomiets V.S., Kudryavtsev S.A., Balalaev M.A. Sovremennyye tendentsi normativnoy bazy informatsionnogo modelirovaniya obyektoy zheleznodorozhnoy infrastruktury Rossii [Modern trends of sets of regulations and norms for information modeling of railway infrastructure objects of Russia] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 2. S. 27–32.

3. Shemyakin V.Yu., Kosmacheva A.A. FPV-effektivnost': osmotry iskustvennykh sooruzhenij s pomoshch'yu innovatsionnykh tekhnicheskikh sredstv [FPV-efficiency: inspections of artificial structures with the help of innovative technical means] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2024. № 12. S. 11-12.

4. Primenenie informatsionnykh modelej iskustvennykh sooruzhenij dlya monitoringa i prognoza bezopasnoj ekspluatatsii v kriolitozone [Application of information models of artificial structures for monitoring and estimation of safe operation in cryolito-zone] / A.A. Peters, T.Yu. Valtseva, I.V. Shestakov, S.A. Kudryavtsev // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. № 4(71). S. 15–26.

5. 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.

6. 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. Vol. 49. Pp. 19–24.

Информация об авторах

В.С. Коломиец – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;

В.Ю. Шемякин – аспирант кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;

С.А. Кудрявцев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения»;

Information about the authors

V.S. Kolomiets – Post Graduate Student, «Bridges, Tunnels and Underground Structures» Department;

V.Y. Shemyakin – Post Graduate Student, «Bridges, Tunnels and Underground Structures» Department;

S.A. Kudryavtsev – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the «Bridges, Tunnels and Underground Structures» Department.

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted: 27.02.2025; approved after reviewing: 20.03.2025; accepted for publication: 27.03.2025.

Научная статья
УДК 621.436-08
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-79-86

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НЕПЛОТНОСТИ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЯ ПО СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРИЦИЛИНДРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Коньков Алексей Юрьевич¹, Конькова Ирина Дмитриевна², Трунов Антон Игоревич³

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

³ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, a_n_t_r_u_n@mail.ru

¹ akonkov1964@gmail.com

² iramanets@yandex.ru

Аннотация. Предложен новый метод диагностирования неплотности цилиндро-поршневой группы дизеля, основанный на анализе сигнала скорости изменения давления, записанного при изменяющемся скоростном режиме работы двигателя. В отличие от известных решений, основанных на анализе внутрицилиндрового давления, предлагаемый метод не требует отключения подачи топлива в цилиндре либо создания иных тестовых воздействий на объект диагностики и, следовательно, может быть реализован как функциональный способ диагностирования. Представлен краткий обзор известных методов диагностики, расчетное исследование и результаты экспериментальной проверки выявленных закономерностей, выполненных на исследовательской установке с отсеком дизеля размерности ЧН18/22.

Ключевые слова: дизель, цилиндропоршневая группа, диагностика, давление, скорость изменения давления, утечки

Original article

FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF DIESEL CYLINDER-PISTON GROUP LEAKAGE BY THE RATE OF CHANGE OF IN-CYLINDER PRESSURE

Konkov Aleksey Yu.¹, Konkova Irina D.², Trunov Anton I.³

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

³ Pacific National University, Khabarovsk, a_n_t_r_u_n@mail.ru

¹ akonkov1964@gmail.com

² iramanets@yandex.ru

Abstract. The authors have developed a new method for diagnosing leaks in the cylinder-piston group of a diesel engine, based on the analysis of the signal of the rate of change of pressure, recorded at a changing speed mode of engine operation. Unlike known solutions based on the analysis of in-cylinder pressure, the proposed method does not require disconnecting the fuel supply to the cylinder or creating other test effects on the diagnostic object and therefore, can be implemented as a functional diagnostic method. The article provides a brief overview of known diagnostic methods, computational studies and the results of experimental verification of the identified patterns, carried out on a research facility with a diesel compartment of dimensions ЧН18/22.

Keywords: diesel, cylinder-piston group, diagnostics, pressure, pressure change rate, leakage

Введение

Снижение гидравлической плотности цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в эксплуатации может возникнуть как вследствие нормального износа трущихся деталей кинематических пар, так и в результате образования трещин, прогара поршней, нагароотложений на седлах клапанов, повреждений самих клапанов и ряда других причин. Эксплуатация двигателя с такими неисправностями существенно ухудшает его технико-экономические показатели, увеличивает вредное воздействие на окружающую среду, а в некоторых случаях может привести к отказам двигателя и стать причиной возникновения аварийных ситуаций на транспорте. Поэтому

на предприятиях, эксплуатирующих транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания, диагностике технического состояния ЦПГ двигателя принято уделять особое внимание. В первую очередь это относится к предприятиям аграрно-технического комплекса и, соответственно, к двигателям автотракторного назначения. Обширный материал, охватывающий вопросы теории и практики диагностирования таких двигателей в целом и их ЦПГ в частности, можно найти в [1]. Краткое и доступное изложение сути наиболее известных методов диагностики ЦПГ ДВС представлено в [2].

В отличие от автотракторных двигателей тепловозный дизель работает в более благоприятных условиях, характеризующихся меньшим содержанием

ем пыли в воздухе, относительно небольшой продолжительностью работы на режимах номинальной и близкой к ней мощности. Кроме того, существующая планово-предупредительная система ремонта и технического обслуживания не стимулирует персонал к выполнению дополнительных диагностических исследований, особенно если существующие средства и методы диагностики требуют значительных временных и материальных затрат.

Все вышесказанное приводит к тому, что в настоящее время можно констатировать пренебрежительное отношение к системе технической диагностики как дизеля в целом, так и в части диагностики его ЦПГ: проверка степени износа деталей ЦПГ выполняется только при полной или частичной разборке при заводских ремонтах двигателя, а средства безразборной диагностики гидравлической плотности ЦПГ используются, в лучшем случае, как средства контроля качества выполнения этих ремонтов. Изменить такую ситуацию без разработки новых, более эффективных методов и средств диагностики не представляется возможным. Актуальность разработки методов и средств диагностики, позволяющих на основе разумной достаточности надежно диагностировать неисправности техники, отражена в Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.

Практически все тепловозные дизели оснащены индикаторными кранами, что делает их контролепригодными для методов, основанных на анализе внутрицилиндрового давления. Опыт ранее выполненных нами в этом направлении работ [3–6] позволяет утверждать, что сигналы давления и его первой производной обладают высокой диагностической информативностью. Однако на практике это обстоятельство может обернуться недостатком и затруднить использование методов ввиду огромного числа факторов, влияющих на характер протекания рабочего процесса, отражаемый в изменении внутрицилиндрового давления. Цель работы – поиск метода надежной оценки неплотности ЦПГ, отличающегося простотой практического использования в условиях обычных режимов функционирования двигателя без применения нагрузочных устройств и особых тестовых воздействий.

Известные подходы при диагностировании неплотности ЦПГ по внутрицилиндровому давлению

Наиболее простой и широко распространенный метод оценки неплотности надпоршневого пространства – определение давления в конце сжатия (часто называемого компрессией) с помощью специальных приборов – максиметров (компрессометров). Особенность измерения этого параметра – необходимость предварительного отключения подачи топлива в контролируемый цилиндр, что увеличивает трудоемкость и существенно затруд-

няет автоматизацию измерений. Определение данного параметра возможно и с помощью более дорогих современных устройств – электронных индикаторов, появившихся в последнее время в локомотивных депо. Следует учитывать, что на величину контролируемого параметра оказывает влияние частота вращения коленчатого вала, тепловое состояние двигателя, термодинамические параметры воздуха перед цилиндром, геометрическая степень сжатия. Важно отметить, что степень сжатия тепловозного дизеля с составными поршнями является регулируемым параметром. На практике в сложившейся системе ремонта тепловозных дизелей давление в конце сжатия определяется в ходе обкатки двигателя после ремонта для определения необходимости регулировки камеры сжатия. В [7] отмечается влияние режима работы других цилиндров на процессы в цилиндре с отключенной подачей топлива, а также особенностей режимов холодной пусковой прокрутки коленчатого вала на точность определения давления в конце сжатия.

Различить влияние утечек и степени сжатия на результаты диагностики можно с использованием подхода [3]. В этом случае измерения выполняются дважды на различных скоростных режимах работы двигателя. Так как продолжительность процесса сжатия от закрытия впускного клапана до положения поршня в ВМТ при каждом измерении будет различной, а геометрическая степень сжатия в цилиндре сохраняется постоянной, то становится возможным на основе теории идентификации [4] оценить отдельно параметры, связанные с утечками рабочего тела и возможным отклонением объема камеры сжатия. Приведенный принцип представляется нам удачным решением и был принят на вооружение при разработке предлагаемого в данной работе метода. Проблемой практического использования метода параметрической идентификации является не только необходимость наличия или разработки достоверных математических моделей, но и сложность программной реализации алгоритмов, требующей разбиения процесса идентификации на несколько этапов с решением задачи многопараметровой оптимизации на каждом из них [4]. Метод может быть реализован как при одновременном измерении индикаторных диаграмм во всех цилиндрах двигателя, так и при последовательном, от цилиндра к цилиндру. Однако в последнем случае потребуется дополнительный контроль параметров воздуха во впускном коллекторе двигателя. В случае с несколькими измерительными каналами (до 16 для тепловозного дизеля) проблемой становится поддержание актуальности тарировки каждого канала.

Способ диагностирования неплотностей ЦПГ дизеля, не чувствительный к погрешности тарировки измерительного канала и, более того, не требующий

её, был разработан при участии авторов в [5]. Способ основан на анализе сигнала скорости изменения давления. На рис. 1 приведены характерные зависимости скорости изменения первой производной давления в цилиндре для двух случаев: со сгоранием (обычный режим работы двигателя) и без сгорания (отключена подача топлива в контролируемом режиме).

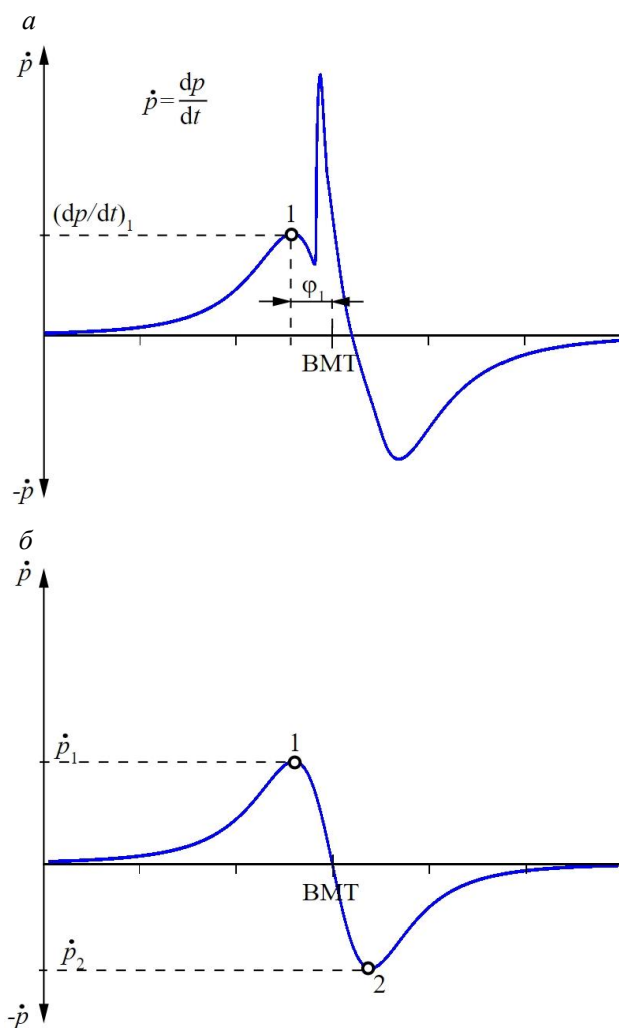


Рис. 1. Форма сигнала скорости изменения давления
вблизи BMT: а – при сгорании; б – без сгорания

В работе теоретически и экспериментально доказано, что при отсутствии тепловыделения в цилиндре абсолютные значения максимума и минимума (точки 1 и 2) зависят, кроме прочего, от количества воздуха, вытекшего из цилиндра на интервале поворота коленчатого вала между этими точками. Абсолютное значение скорости изменения давления в точке 2 всегда больше скорости в точке 1, и это расхождение тем больше, чем больше утечки воздуха. На основании выполненных исследований был предложен критерий неплотности, определение которого может быть выполнено только анализом формы самой кривой сигнала, без необходимо-

сти пересчета результатов его измерения (вольты, коды аналого-цифрового преобразователя) в физические величины сигнала.

Сигнал скорости изменения давления может быть получен численным дифференцированием сигнала давления или прямым измерением за счет соответствующей схемотехники преобразователя сигнала с пьезоэлектрического датчика. В последнем случае сигнал содержит вибрационную составляющую, которая несет дополнительную диагностическую информацию о работе клапанного механизма газораспределения, что на наш взгляд, является достоинством метода. При этом соблюдение определенных условий позволяет из сигнала скорости изменения давления численно получить достоверный сигнал давления с лучшим отношением «сигнал–шум» [6].

Интересный факт: преимущество сигнала скорости изменения давления в сравнении с сигналом давления для определения неплотности цилиндра было известно достаточно давно. Так, авторы [1] отмечают, что если отношение давлений в конце сжатия у новой и предельно изношенной ЦПГ двигателя Д-50 в режиме прокручивания ($200\text{--}400\text{ мин}^{-1}$) составляет $1,2\text{--}1,3$, то отношение максимумов сигнала скорости изменения давления этих же ЦПГ будет составлять $1,6\text{--}1,7$. Впрочем, здесь же авторы отмечают, что «попытки определения технического состояния ЦПГ по этому показателю не дают удовлетворительных результатов» и объясняют это «большим количеством побочных факторов», оказывающих влияние на результаты измерений. С момента публикации цитируемых строк прошло без малого 50 лет. Новая измерительная техника, алгоритмы цифровой обработки сигналов наряду с численными методами моделирования рабочих процессов двигателя значительно изменили положение дел и позволили по-новому взглянуть на диагностические особенности сигнала скорости изменения давления. Некоторые новые закономерности, выявленные на данный момент, представлены ниже.

Все исследования (расчетные и экспериментальные) выполнены для ЦПГ дизеля размерности ЧН18/22 производства завода «Дальдизель», г. Хабаровск.

Рабочая гипотеза и расчетное исследование

Представленный на рис. 1, а сигнал также содержит хорошо отличимый на участке сжатия локальный максимум (точку 1), несмотря на начинающееся через несколько градусов сгорание и соответствующий скачок скорости нарастания давления. Опыт выполненных нами ранее работ показал, что только в очень редких случаях (при слишком раннем сгорании) у быстроходных двигателей можно столкнуться с затруднениями при определении ко-

ординат этой точки. Для тепловозных и судовых среднеоборотных дизелей данная проблема отсутствует. Ордината этой точки зависит от многих факторов. Среди них следующие: скорость перемещения поршня; масса сжимаемого воздуха, зависящая в свою очередь от параметров воздуха на впуске; условия теплообмена воздуха со стенками камеры сгорания, а также другие факторы, включая и интересующие нас утечки воздуха через неплотности. Если записать сигнал скорости изменения давления в течение нескольких секунд, на протяжении которых двигатель будет разгоняться или замедляться при работе без нагрузки, то при последующем анализе сигнала можно получить данные о значении сигнала в характерной точке 1 и имевшей при этом место частоте вращения коленчатого вала. Так как параметры воздуха во впускном коллекторе в этом случае не должны существенно измениться, равно как и тепловое состояние деталей ЦПГ, то основное влияние на величину максимума скорости нарастания на участке сжатия будут оказывать скорость поршня и утечки, что дает надежду

выявить закономерности, позволяющие косвенно оценить утечки при известных значениях максимумов каждого цикла и средней частоты вращения коленчатого вала на протяжении данного цикла.

С целью подтверждения заявленной гипотезы было выполнено расчетное исследование с использованием разработанной на кафедре «Транспорт железных дорог» математической модели, реализованной в форме компьютерных программ на языках Matlab и Scilab.

Модель построена на основе первого закона термодинамики применительно к рабочему телу, заключенному в цилиндре двигателя. Система рассматривается как открытая термодинамическая система. Рабочее тело – смесь идеальных газов переменного за цикл состава. Для повышения точности расчетов учитывается влияние температуры на теплоемкость газов. Изменение давления на каждом шаге численного интегрирования может быть представлено уравнением объемного баланса в следующем виде:

$$dp = \frac{kp}{V} (dV_x + dV_{conv} + dV_{leak} + dV_{inp} + dV_{out} - dV), \quad (1)$$

где k – показатель адиабатного процесса; p – давление в цилиндре; V – объем цилиндра; dV_x – изменение объема из-за тепловыделения при горении топлива; dV_{conv} – изменение объема из-за теплообмена; dV_{leak} – изменение объема из-за утечек; dV_{inp} , dV_{out} – изменение объема из-за перетекания газа через впускные и выпускные органы газораспределения; dV – изменение объема из-за движения поршня.

При моделировании использовались следующие допущения:

- нестационарный процесс разгона и замедления представлялся как совокупность установившихся циклов, в которых частота вращения увеличивается скачкообразно по окончании цикла, а в пределах цикла угловая скорость коленчатого вала постоянна;
- давление и температура воздуха во впускном коллекторе, а также давление и температура газов в выпускном коллекторе не изменяются от цикла к циклу;
- средняя температура стенок рабочей камеры принималась величиной, постоянной от цикла к циклу;
- утечки рабочего тела происходят через условное отверстие с постоянной площадью.

Подробное описание основных положений математической модели и особенностей ее реализации в среде Matlab/Simulink и Scilab/Xcos представлено в [8, 9].

План численного эксперимента предполагал расчет диаграмм скорости изменения давления в цикле при варьируемых значениях эквивалентной площади

неплотностей и частоты вращения. Расчеты были выполнены для холостого хода при неработающих агрегатах наддува и при частичной нагрузке с работающим турбокомпрессором. При моделировании утечек задавалась площадь условного отверстия в диапазоне от 0 до 0,6 см² с шагом 0,05 см². Для каждого значения площади утечек расчет выполнялся для нескольких частот вращения коленчатого вала в диапазоне от 300 до 750 мин⁻¹ с шагом 50 мин⁻¹. Указанные пределы изменения частоты вращения коленчатого вала примерно соответствуют частоте холостого хода и номинальной частоте вращения коленчатого вала для двигателя 6ЧН18/22.

На рис. 2 показаны графики изменения максимальной скорости нарастания давления на участке сжатия (ордината точки 1, рис. 1) от частоты вращения коленчатого вала для двух режимов работы двигателя: холостого хода и частичной нагрузки, соответствующей давлению наддувочного воздуха 1,74 бар. Видно, что максимум скорости нарастания давления практически линейно возрастает по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала. Нелинейность проявляется только на малых оборотах вала и при больших значениях площади утечек. Характер наблюдаемых зависимостей сохраняется для обоих исследованных режимов (холостой ход и частичная нагрузка), но абсолютные значения во втором случае выше пропорционально увеличению плотности воздуха во впускном коллекторе.

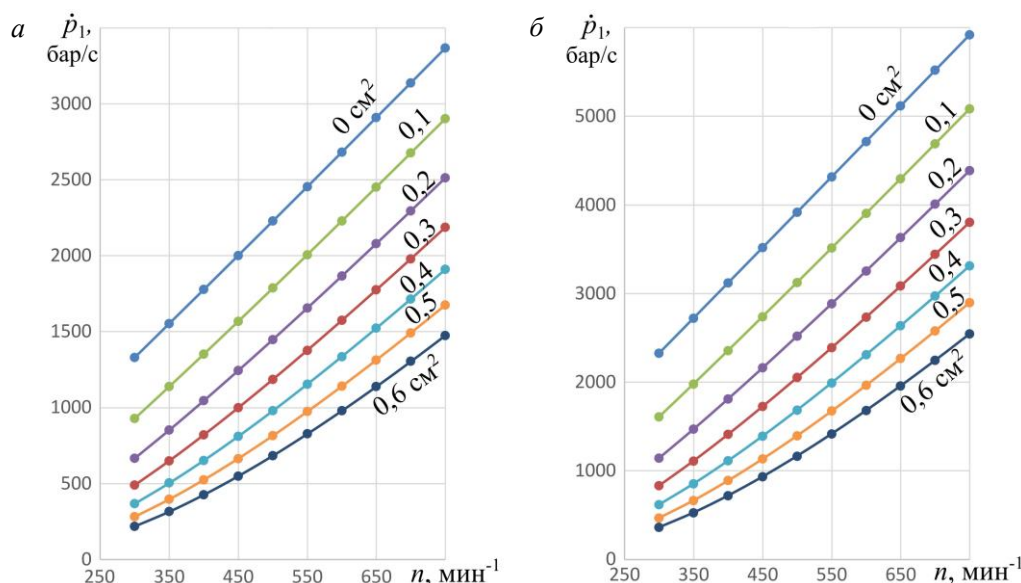


Рис. 2. Зависимости скорости изменения давления в точке 1 (максимум на участке сжатия) от частоты вращения коленчатого вала при различных площадях неплотностей:
а – без нагрузки; б – с частичной нагрузкой

Следует отметить, что угол поворота коленчатого вала, при котором скорость нарастания давления на участке сжатия достигает максимума φ_1 (см. рис. 1, а), также несколько изменяется по мере увеличения площади утечек. При отсутствии утечек его значение составляет $16,4^\circ$ до ВМТ и не зависит от скоростного режима. При площади утечек $0,2 \text{ см}^2$, соответствующей нормальному состоянию поршневой группы, это значение меняется от $18,6^\circ$ на максимальных оборотах коленчатого вала до 22° при оборотах холостого хода. И при максимальном износе поршневой группы (площадь утечек $0,6 \text{ см}^2$) это изменение составляет от 23° до 33° соответственно. Плотность воздуха во впускном коллекторе не оказывает влияния на этот угол.

Анализ полученных результатов позволил также выявить еще одну интересную особенность. При отсутствии утечек и росте оборотов коленчатого вала максимум скорости нарастания давления увеличивается ровно во столько же раз, во сколько увеличивается частота вращения коленчатого вала. Соотношение этих величин при наличии утечек изменяется в сторону большего изменения отношения скоростей давления, по сравнению с отношением частот вращения. Причем, чем больше утечки, тем больше данная диспропорция. На основании этого наблюдения был предложен безразмерный коэффициент k_n , который может выступать в роли диагностического признака, количественно оценивающего неплотность цилиндра

$$k_n = \frac{(dp/dt)_1^{max}}{(dp/dt)_1^{min}} \frac{n_{min}}{n_{max}}, \quad (2)$$

где n_{min} и n_{max} – соответственно минимальные и максимальные обороты вала в переходном процессе; $(dp/dt)_1^{min}$ и $(dp/dt)_1^{max}$ – скорости нарастания давления в точке 1 при этих частотах вращения коленчатого вала.

На рис. 3 показан график зависимости площади утечек от данного коэффициента, подсчитанного для номинальной и минимальной частоты вращения коленчатого вала. Как видно из рисунка, параметры воздуха во впускном коллекторе не оказывают заметного влияния на представленную зависимость. При отсутствии утечек (на современном этапе технически недостижимо) коэффициент k_n был бы равен единице. Чем больше величина k_n , тем больше площадь утечек.

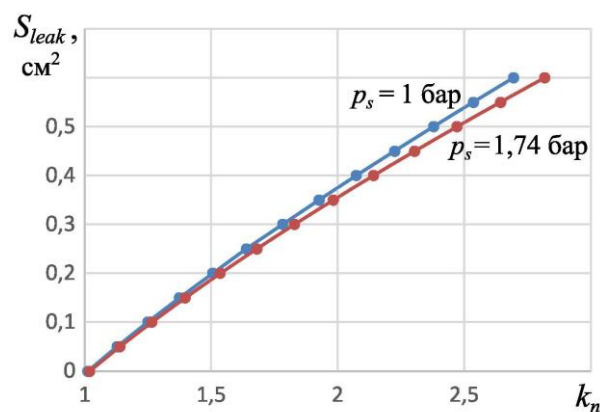


Рис. 3. Зависимости площади утечек S_{leak} от коэффициента k_n при разных давлениях воздуха во впускном коллекторе p_s (расчет выполнен для $n_{min} = 300 \text{ мин}^{-1}$; $n_{max} = 750$)

Экспериментальная проверка

С целью подтверждения найденных при расчетном исследовании зависимостей была выполнена запись сигнала скорости изменения давления с привязкой к углу поворота коленчатого вала на двигателе исследовательской установки ОЧН18/22 (отсек дизеля размерности ЧН18/22), установленном в лаборатории ДВС Тихоокеанского государственного университета. Измерительный канал включал пьезоэлектрический датчик давления Kistler 6613EQ13-C, преобразователь «ток–напряжения» и внешнюю плату АЦП NI USB-6009. Подробнее о схемотехнике преобразователя, тарировке канала и т.п. можно прочесть в [6]. В данной работе привязка сигнала скорости изменения давления осуществлялась с помощью датчика Холла, реагирующего на метку на маховике двигателя, соответствующую положению поршня в ВМТ. Это позволило упростить нахождение ординаты точки максимума скорости на участке сжатия, которая определялась как математическое ожидание сигнала в

окрестности угла поворота 346° с отклонением $2,5^\circ$ в каждую сторону (рис. 4). Очевидно, что такой способ нельзя считать лучшим для решаемой задачи, однако, на данном этапе исследования и такой подход позволил подтвердить ожидаемые результаты.

Измерения выполнялись шесть раз с записью 10-секундных файлов с сигналами скорости изменения давления и отметки ВМТ. Суммарное время дискретизации на оба канала составляло 50 мкс. Записи осуществлялись как при разгоне двигателя, так и при его торможении. Компрессоры стенда, предназначенные для имитации системы наддува, были отключены. За указанный интервал времени частота вращения вала двигателя изменялась от 50 до 130 оборотов в минуту. При последующем анализе записанных данных выделялись отдельные циклы, для каждого из которых вычислялись средняя частота вращения вала за цикл и ордината точки 1 описанным выше способом. Результаты обработки данных всех записанных режимов приведены на рис. 5.

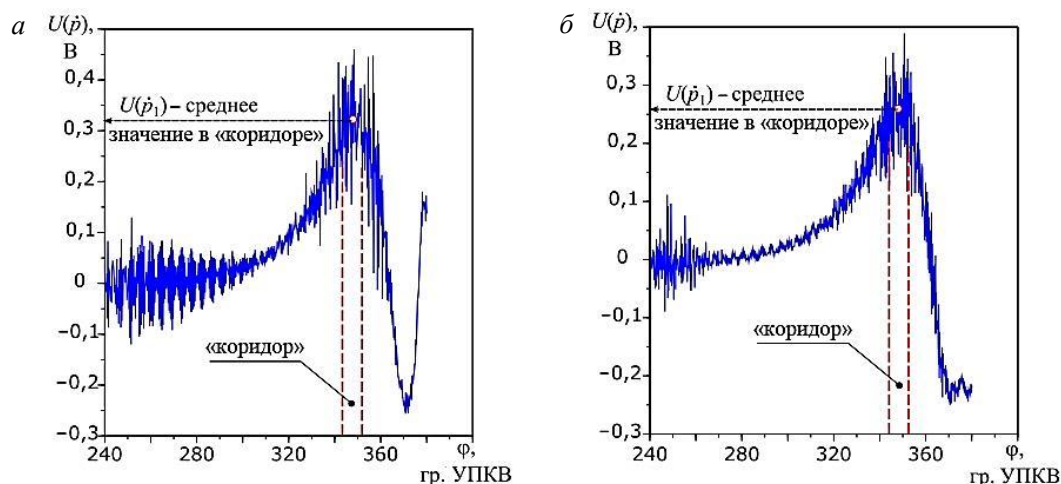


Рис. 4. Фрагменты сигнала скорости изменения давления и схема определения ординаты точки 1:
а – в конце разгона до 800 мин^{-1} ; б – в конце торможения до 700 мин^{-1}

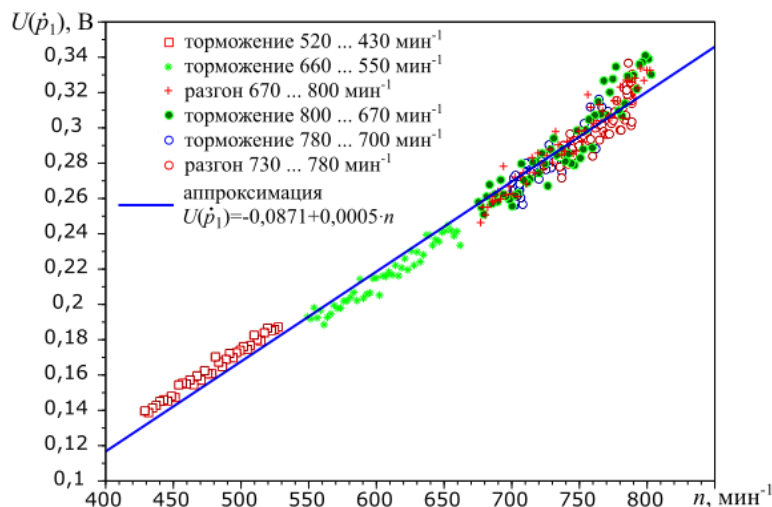


Рис. 5. Результаты обработки экспериментальных данных

Одним из преимуществ прямого измерения сигнала скорости изменения давления, на наш взгляд, является отсутствие смещения сигнала относительно нуля, поэтому тарировочная зависимость для сигнала скорости изменения давления имеет вид: $U = k \frac{dp}{dt}$. Следовательно, для нахождения безразмерного коэффициента по формуле (2) нет необходимости пересчета сигнала скорости изменения давления в физическую величину. Расчет этого коэффициента может быть выполнен по данным напряжения на выходе преобразователя (см. рис. 5). Для скоростного интервала 300...750 мин⁻¹, используемого ранее при расчете (см. рис. 3), расчет k_n осуществлялся по аппроксимационному уравнению прямой линии, с представленными на рисунках коэффициентами аппроксимации. Значение коэффициента k_n при этом составило 1,5, что соответствует ожидаемому исправному состоянию ЦПГ двигателя.

Выводы

Теоретически и экспериментально выявлены закономерности изменения максимума скорости нарастания давления в цилиндре двигателя на такте сжатия, позволяющие реализовать функциональное диагностирование неплотности ЦПГ на режимах разгона и торможения. Метод основан на прямом измерении сигнала скорости изменения давления с помощью пьезоэлектрического датчика и не требует высоких метрологических характеристик измерительного канала. Первоочередные задачи на пути практического внедрения метода:

- повышение точности определения значений максимума скорости изменения давления на участке сжатия отдельного цикла с учетом высокой зашумленности сигнала;
- отработка технологии измерения и методики проведения эксперимента с учетом условий измерений в машинном отделении локомотива;
- экспериментальная проверка точности предлагаемого метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Диагностика автотракторных двигателей / под ред. Н.С. Ждановского. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Колос, 1977. 264 с.
2. Просвилов Ю.Е., Басов С.А. Надежность работы и методы диагностики цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // Вестник РГУПС. 2010. № 2(38). С. 40–45.
3. Лашко В.А., Коньков А.Ю. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента // Известия высших учебных заведений. 2007. № 6. С. 46–53.
4. Коньков А.Ю., Лашко В.А. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации // Двигателестроение. 2009. № 3(237). С. 19–23.
5. Диагностирование неплотности цилиндра дизеля по результатам измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления / А.Ю. Коньков, А.И. Трунов, И.Д. Конькова, Ю.А. Давыдов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2018. № 4(51). С. 9–16.
6. Коньков А.Ю., Трунов А.И., Демаков К.К. Экспериментальная проверка способа индицирования дизеля по данным асинхронного измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2023. № 3(70). С. 7–18.
7. Нечаев В.В., Воробьев Е.В., Тарасенко А.А. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3(50). С. 23.
8. Конькова И.Д., Давыдов Ю.А., Коньков А.Ю. Математическая модель моторного цикла дизеля и ее программная реализация в среде SIMULINK MATLAB // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 5(71). С. 73–80.
9. Пучкова А.Д., Коньков А.Ю., Конькова И.Д. Модель тепловыделения в цилиндрах дизеля и ее компьютерная реализация в среде SCILAB/COS // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 2(35). С. 99–105.

REFERENCES

1. Diagnostika avtotraktornykh dvigatelei [Diagnostics of automobile and tractor engines]. 2-e izd. pererab. i dop. / pod red. N.S. Zhdanovskogo. Leningrad : Kolos, 1977. 264 s.
2. Prosvirov, Yu.E., Basov S.A. Nadezhnost' raboty i metody diagnostiki tsilindroporshnevoi gruppy dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Reliability of operation and diagnostic methods of the cylinder-piston group of internal combustion engines] // Vestnik RGUPS. 2010. № 2(38). С. 40–45.
3. Lashko V.A., Kon'kov A.Yu. Primenenie metodov imitatsionnogo modelirovaniia rabochikh protsessov dizelia pri interpretatsii rezul'tatov diagnosticheskogo eksperimenta [Application of simulation methods of diesel engine operating processes in interpreting the results of a diagnostic experiment] // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. 2007. № 6. С. 46–53.
4. Kon'kov A.Yu., Lashko V.A. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoiianiia teplovoznogo dizelia po indikatornoi diagramme na osnove teorii identifikatsii [Diagnostics of the technical condition of a diesel locomotive using an indicator diagram based on identification theory] // Dvigatelsestroenie. 2009. № 3(237). С. 19–23.
5. Diagnostirovanie neplotnosti tsilindra dizelia po rezul'tatam izmereniia skorosti izmeneniia vnutritsilindrovogo davleniia [Diagnostics of diesel cylinder leakage based on the results of measuring the rate of change of in-cylinder pressure] / A.Yu. Kon'kov, A.I. Trunov, I.D. Kon'kova, Yu.A. Davydov // Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2018. № 4(51). С. 9–16.

6. Kon'kov A.Yu., Trunov A.I., Demakov K.K. Eksperimental'naia proverka sposoba inditsirovaniia dizelia po dannym asinkhronnogo izmereniia skorosti izmeneniia vnutritsilindrovogo davleniia [Experimental verification of the method of diesel engine indication based on asynchronous measurement of the rate of change of in-cylinder pressure] // Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2023. № 3(70). S. 7–18.

7. Nechaev V.V., Vorob'ev E.V., Tarasenko A.A. Metodiki tekhnicheskogo diagnostirovaniia tsilindroporshnevoi gruppy dizelei kholodnoi puskovoi prokrutkoi kolenchatogo vala [Methods of technical diagnostics of the cylinder-piston group of diesel engines by cold starting cranking of the crankshaft] / V.V. Nechaev, // Inzhenernyi vestnik Dona. 2018. № 3(50). S. 23.

8. Kon'kova, I.D., Davydov I.U.A., Kon'kov A.Yu. Matematicheskai model' motornogo tsikla dizelia i ee programmnaia realizatsiia v srede SIMULINK MATLAB [Mathematical model of diesel engine cycle and its software implementation in SIMULINK MATLAB environment] // Vestnik transporta Povolzh'ia. 2018. № 5(71). S. 73–80.

9. Puchkova A.D., Kon'kov A.Yu., Kon'kova I.D. Model' teplovydeleniia v tsilindrakh dizelia i ee komp'iuternaia realizatsiia v srede SCILAB/COS [Model of heat generation in diesel cylinders and its computer implementation in the SCILAB/COS environment] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2023. № 2(35). S. 99–105.

Информация об авторах

А.Ю. Коньков – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспорт железных дорог»;

И.Д. Конькова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт железных дорог»;

А.И. Трунов – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии.

Information about the authors

A.Y. Kon'kov – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Railway Transport Department;

I.D. Kon'kova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, the Railway Transport Department;

A.I. Trunov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, the Higher School of Industrial Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 17.03.2025.

The article was submitted: 12.02.2025; approved after reviewing: 17.03.2025; accepted for publication: 17.03.2025.

Научная статья
УДК 629.065
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-87-93

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ОТ ИСПАРЕНИЙ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ВЫГРУЗКЕ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Кузьмин Олег Сергеевич¹, Луценко Андрей Николаевич², Куликова Елена Сергеевна³

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

³ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, kulikovaes@mail.ru

¹ readheadunit@mail.ru

² andyhab@mail.ru

Аннотация. Предложен метод защиты окружающей среды от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, происходящих в результате испарений нефтепродуктов в ходе их выгрузки из железнодорожного транспорта, путем улавливания и адсорбции паров.

Также разработано стационарное устройство для железнодорожных сливных эстакад, обеспечивающее герметизацию железнодорожных цистерн с отводом паровоздушной смеси до адсорбера. Эффективность предлагаемого решения подтверждена экспериментальными исследованиями на специализированном стенде, воспроизводящим процесс выгрузки нефтепродуктов. Актуальность исследования обеспечена Стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. [1] и национальными целями развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г. [2], согласно которым одной из приоритетных задач политики РФ является снижение выбросов загрязняющих веществ, оказывающих наиболее негативное влияние на окружающую среду в городах и населенных пунктах. Научная новизна обеспечена следующим: обоснованием необходимости защиты окружающей среды от загрязняющего воздействия, оказываемого в рамках выгрузки нефтепродуктов из железнодорожного транспорта; разработкой технических решений, адаптированных под выгрузку нефтеналивных грузов из железнодорожных вагонов-цистерн; экспериментальным определением эффективности и эксплуатационного ресурса адсорбера в условиях непрерывности производственного процесса на примере объекта г. Хабаровска Хабаровского края.

Представлены результаты исследования, направленного на определение загрязняющего воздействия, оказываемого на окружающую среду в результате испарений нефтеналивных грузов, возникающих на этапе выгрузки в рамках перевозочного процесса, осуществляемого железнодорожным транспортом на территории Хабаровского края.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагоны-цистерны, перевозочный процесс, нефтепродукты, загрязняющие вещества, выбросы, адсорбция, экология, окружающая среда, защита, нефть

Original article

REDUCTION OF POLLUTANT EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE FROM VAPORIZATION OF PETROLEUM PRODUCTS DURING THEIR UNLOADING FROM RAILWAY TRANSPORT

Kuzmin Oleg S.¹, Lutsenko Andrey N.², Kulikova Elena S.³

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

³ Pacific National University, Khabarovsk, kulikovaes@mail.ru

¹ readheadunit@mail.ru

² andyhab@mail.ru

Abstract. The paper proposes a method of environmental protection from the emission of pollutants into the atmosphere resulting from vaporization of oil cargoes during their unloading from railway transport by means of vapor capture and adsorption.

Also, a stationary device for railway discharge trestles is developed, which provides sealing of railway tank cars with vapor-air mixture removal up to adsorber. The effectiveness of the proposed solution is confirmed by experimental studies on a specialized stand reproducing the process of oil products unloading. The relevance of the study is provided by the Strategy of ecological security of the Russian Federation for the period up to 2025 [1] and national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the perspective up to 2036 [2], according to which one of the priority tasks of the policy of the Russian Federation is to reduce emissions of pollutants that have the most negative impact on the environment in cities and settlements.

The scientific novelty of the solution of the problem indicated by the topic of the article is provided by: substantiation of the necessity to protect the environment from the polluting impact made within the framework of unloading of oil products from the railway transport; development of technical solutions adapted for unloading of oil cargoes from railroad tank cars; experimental deter-

mination of efficiency and operational life of adsorber under the conditions of continuous production process on the example of the facility г. Khabarovsk, Khabarovsk Krai.

Keywords: railway transport, tank wagons, transportation process, oil products, pollutants, emissions, adsorption, ecology, environment, protection, oil

Введение

Железнодорожный транспорт является старейшим средством перевозок нефти и продуктов ее переработки, насчитывающим более чем 150-летнюю историю [3]. Несмотря на это, проблема экологической безопасности, в рамках перемещения нефтеналивных грузов (ННГ) данным видом транспорта, остается актуальной и в настоящее время.

При этом наиболее часто упоминаемым источником загрязнения, отмечаемым в отечественной и зарубежной научной базе, являются аварийные разливы, происходящие на этапе следования опасных грузов [4, 5]. Освещенность данной проблематики, а также ее экологическая и экономическая значимость, пополнила данную область многочисленными решениями и подходами, направленными на повышение уровня безопасности доставки опасного груза по железной дороге.

Однако, если процитировать В.И. Медведева: «Отправитель опасного груза "заложил" вероятность аварии, а перевозчик ее перенес к последнему элементу цепи – грузополучателю» [6]. Да, действительно, заключительный, отгрузочный этап транспортировки нефтеналивных грузов также способен оказывать загрязняющее воздействие на окружающую среду. Причем, в отличие от вышеуказанного этапа, данное воздействие проявляется не периодически, а постоянно.

Под постоянным источником загрязнения, в рамках отгрузки ННГ, подразумеваются их выбросы в атмосферу от испарений, происходящие через открытые люки железнодорожных цистерн [7], которые из соображений безопасности должны быть открыты на протяжении всего периода слива продукта во избежание разряжения в котле опорожняемой цистерны [8]. Таким образом, не остается сомнений в актуальности вопроса повышения экологической безопасности путем сокращения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в ходе выгрузки ННГ из железнодорожного состава.

Основная часть

На данный момент доминирующий объем исследований посвящен потерям от испарений в результате наливных операций, осуществляемых преимущественно с вертикальными стальными резервуарами либо железнодорожными цистернами. Разработанность темы позволила развить ряд методик и средств по сокращению выбросов паровоздушной смеси (ПВС) в атмосферу. К примеру, исследования С.А. Коршака и А.В. Кулагина [9–11] усовершенствовали методы по определению потерь легких нефтепродуктов от испарений из резервуаров типа РГС, РВС и РВСП, а также их последующему сокращению.

Многочисленные исследования данной темы другими учеными позволили сформировать следующие методы по сокращению потерь от испарений:

- использование специальных покрытий (понтон, плавающих крыш);
- применение газоуравнительных систем;
- снижение температурного воздействия;
- рекуперация паров;
- улавливание паров.

Однако не все вышеперечисленные решения подходят под использование на железнодорожном подвижном составе. Во многом это обусловлено конструктивными особенностями железнодорожных цистерн: повторяя горизонтальный резервуар, котлы цистерн обладают формой, невозможной к использованию понтон и плавающих крыш.

Применение газоуравнительных систем либо газовой обвязки невозможно по причине идентичности технологического процесса (опорожнения), осуществляемого всеми цистернами одновременно.

Снижения температурного воздействия получается достичь постоянным поддержанием температурного режима, что в условиях отчужденности железной дороги нереализуемо.

Метод рекуперации ПВС оправдан на объектах, имеющих высокоактивный режим испарения ННГ, обусловленный турбулентным движением нефтепродуктов и вытеснением ПВС при отгрузке (наливе) цистерн.

В таком случае, наиболее подходящим методом защиты окружающей среды от выбросов ЗВ в атмосферу при выгрузке ННГ из железнодорожных цистерн является улавливание ПВС с дальнейшим ее поглощением путем адсорбции. Ключевая задача решения – адаптация метода улавливания ПВС под технологические особенности выгрузки ННГ. При этом адсорбирующее вещество следует рассматривать как расходный материал, в связи с чем сопутствующей задачей станет исследование эксплуатационного ресурса вещества за период «от замены до замены», проведение которого планируется реализовать экспериментальным методом.

Главный критерий натурных испытаний – создание условий, максимально приближенных к реальным. Основой для эксперимента выступает технологический процесс выгрузки ННГ, при этом организация процесса должна предусматривать возможность его многократного повторения. Для реализации эксперимента разработан испытательный стенд, воссоздающий условия реально действующего типового объекта выгрузки ННГ (рис. 1, 2).



Рис. 1. Процесс сборки емкости экспериментального стенда



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда

Суть эксперимента заключается в инструментальном измерении уровня концентрации углеводородов в ПВС, выходящей из емкости, наполненной адсорбентом, а также остаточной концентрации на трех высотных точках в емкости с нефтепродуктом после ее опорожнения.

Принимая во внимание лабораторные условия, испытательный стенд воспроизведен со стократным уменьшением. Сопровождение эксперимента планируется осуществлять комплексом контрольно-измерительного, а также противоаварийного оборудования. Аналогом железнодорожной цистерны выступает емкость E-1 объемом $0,8 \text{ м}^3$, что соответствует уменьшенному объему цистерны 66-го

типа (80 м^3). В качестве приемного резервуара выступает емкость E-2 объемом 1 м^3 .

Контроль параметров технологического процесса в ходе эксперимента осуществлялся приборами измерения температуры 1, давления 2 и вакуума 3. Предотвращение разряжения в емкости E-1, а также приток воздуха при опорожнении обеспечивается двумя обратными клапанами 4. Газоудаление и измерение ПВС организовано через предусмотренную линию отвода, оснащенную запорной арматурой и измерителем 5, соединенным с емкостью с адсорбентом (адсорбером) 6 объемом 1 л посредством гибкого шланга. В качестве адсорбента выступает активированный уголь мелкой фракции.

Измерение концентрации загрязняющих веществ в смеси, выходящей из адсорбера и внутри котла цистерны, выполнялось переносным газоанализатором Колион-1В-04 с взрывозащищенным исполнением 7. Регистрация значений остаточной концентрации в емкости Е-1 осуществлялась газоанализатором через патрубок доступа в емкость 8. В целях защиты эксперимента от возникновения статического электричества обвязка оборудования стенда оснащена защитным заземлением 9. Газоудаление при выполнении перепускных операций по возврату нефтепродукта в емкость Е-1 и при его сливе в емкость Е-2 обеспечивалось через линии отвода ПВС 10, 11.

Учитывая, что метод улавливания паров при выгрузке ННГ все же допускает выход ПВС в атмосферу, эффективность данного решения будет оцениваться через уровень концентрации загрязняющих веществ на выходе из адсорбера. При этом ключевым фактором выступает способность адсорбера как можно дольше обеспечивать приемлемый уровень поглощения паров. В таком случае, в рамках эксперимента принимается, что эксплуатационный ресурс адсорбера считается исчерпанным по достижению следующего условия:

$$C_j \geq \text{ПДК}_{\text{нп}}, \quad (1)$$

где C_j – концентрация, измеренная газоанализатором на выходе из адсорбера, мг/м³; $\text{ПДК}_{\text{нп}}$ – предельно-допустимая концентрация, установленная для нефтепродукта, мг/м³.

Оценка эксплуатационного ресурса применяемого адсорбента происходит исходя из количества циклов выгрузки до момента снижения эффективности. Испытания проводились в течение года для получения данных при разных температурных условиях и были выполнены в следующем порядке.

1. Заполнение емкости Е-1 нефтепродуктом.
2. Выполнение замеров уровня нефтепродукта в емкости.
3. Опорожнение емкости Е-1.
4. Проведение измерений концентрации загрязняющих веществ на выходе из адсорбера.
5. Проведение измерений остаточной концентрации в емкости Е-1 после ее опорожнения.
6. Возврат нефтепродукта в емкость Е-1 из емкости Е-2.
7. Повторение цикла.

Контроль газоудаления и регистрация объема ПВС в ходе слива велись при помощи измерителя. В качестве измеряемого нефтепродукта принят бензин АИ-95, величина $\text{ПДК}_{\text{нп}}$ которого составляет 100 мг/м³.

Согласно паспорту используемого газоанализатора, калибровка датчика выполнялась по бензолу,

в связи с чем при проведении измерений учитывалась необходимость градуировки по формуле:

$$C_{oj} = K_j C_j, \quad (2)$$

где C_{oj} – концентрация анализируемого вещества, мг/м³; C_j – концентрация, измеренная газоанализатором на выходе из адсорбера, мг/м³; K_j – коэффициент пересчета.

В соответствии с руководством к газоанализатору при пересчете C_{oj} для бензина по бензолу коэффициент пересчета K_j будет равен 3,5. Величина эксплуатационного ресурса адсорбера определялась в зависимости от приближения значения C_{oj} к ПДК бензина. Остаточная концентрация ПВС в котле после слива измерялась на трех высотных уровнях: h_1 (нижнем), h_2 (среднем) и h_3 (верхнем). По результатам испытаний сформирован сравнительный график концентраций (рис. 3).

Исходя из данных на графике видно, что величина C_{oj} на выходе из адсорбера ниже значения ПДК, а также значительно ниже концентрации, измеренной у устья горловины емкости, чем подтверждается эффективность метода улавливания паров, позволяющего сократить выбросы загрязняющих веществ от испарений нефтепродукта в ходе его выгрузки. В то же время наблюдается снижение эксплуатационного ресурса адсорбера по мере увеличения количества операций, и за 47 выгрузок потеря ресурса составила порядка 48 %. С учетом такой динамики, справедливо прогнозировать, что полный эксплуатационный ресурс адсорбера будет исчерпан после выполнения около 100 операций по выгрузке без проведения десорбции либо замены адсорбента.

Несомненно, такой метод эффективен, однако, требует периодического обновления адсорбента либо его десорбции. Также стоит обратить внимание на показания остаточной концентрации. Несмотря на сравнительно высокое значение на верхнем уровне h_3 , концентрация не является критической и практически приближена к ПДК углеводородов нефти (300 мг/м³).

Как и предполагалось, концентрации на уровнях h_2 и h_1 имеют более высокие показатели, и их выброс способен оказывать серьезную негативную нагрузку на окружающую среду. Смесь с такой остаточной концентрацией может быть запечатана и увезена в цистерне до участка налива, где будет окончательно удалена через организованную систему газоотвода. В таком случае остается открытым вопрос герметизации и обеспечения отвода паров ННГ из цистерны в адсорбер на протяжении всего периода выгрузки ННГ.

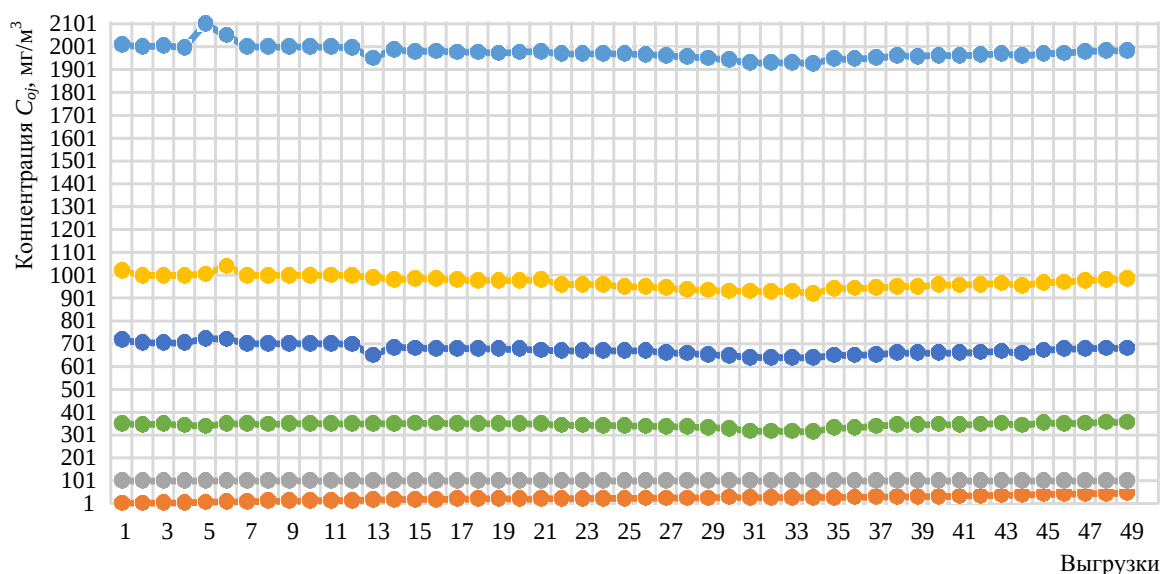


Рис. 3. Сравнительный график концентрации углеводородов при выгрузке ННГ:
— концентрация у устья горловины емкости; — ПДК; — концентрация на выходе из адсорбера; — h_1 ; — h_2 ; — h_3

Существующие сливные железнодорожные эстакады не оснащены средствами организованного отвода ПВС и герметизации котлов железнодорожных цистерн. Такие решения реализованы преимущественно на наливных эстакадах, в составе которых применяются специализированные устройства налива типа УНЖ, имеющие в своем составе герметизирующие конусы, монтируемые на горловины люков цистерн. Следовательно, решения вопроса герметизации цистерны при выполнении сливных операций возможно достичь через адаптацию существующих средств под эстакады выгрузки ННГ. В качестве технического решения предлагается устройство герметизации цистерны (УГЦ) (рис. 4).

УГЦ представлено стационарным устройством, монтируемым на металлоконструкции верхней эксплуатационной зоны железнодорожной эстакады. Устройство состоит из поворотного кронштейна 1, выполненного из нержавеющей стали и соединенного с герметизирующим диском 2, при этом диск оснащен приточным клапаном 3 и двумя лючками обслуживания 4, служащими для доступа персонала к штанге цистерны и проведения замеров. Устройство имеет в своем составе линию удаления ПВС, представленную резинотканевым шлангом 5, связывающим горловину цистерны с адсорбером 6, также монтируемым на эстакаде. УГЦ в связке с адсорбером образует единую систему отвода и поглощения ПВС, работа которой заключается в следующем. При подаче железнодорожной цистерны с нефтепродуктом на фронт слива эксплуатационный персонал приступает к подготовительным работам. После опускания перекидного трапа и обеспечения доступа к площадке ци-

стерны оператор путем манипулирования поворотным кронштейном переводит УГЦ из гаражного положения в рабочее, подводя установку в район площадки цистерны.

Находясь на площадке, оператор открывает крышку люка железнодорожной цистерны и незамедлительно осуществляет герметизацию путем посадки герметизирующего диска на горловину люка. При этом обрезиненный конус диска УГЦ жестко фиксируется на горловине люка цистерны. Цистерна считается загерметизированной.

Таким образом, свободные и неконтролируемые выбросы загрязняющих веществ от испарений при выгрузке ННГ в атмосферу исключены. Проведение замеров, взятие проб ННГ, а также выполнение операций по открытию и закрытию донного клапана цистерны возможно через лючки, обеспечивающие кратковременный доступ вовнутрь котла цистерны, за счет чего выбросы, происходящие в ходе подготовительных работ, значительно снижены.

При непосредственном выполнении процесса выгрузки ННГ внутри котла цистерны создается разрежение, которое выравнивается до безопасного значения за счет срабатывания впускного клапана, дополнительно оборудованного огнепреградителем. Недопущение разрежения осуществляется за счет пропускной способности клапана по вакууму, рассчитываемой по формуле

$$Q = M + 0,22 V, \quad (3)$$

где Q – пропускная способность клапана по вакууму, $\text{м}^3/\text{ч}$; M – производительность слива нефтепродукта из резервуара, $\text{м}^3/\text{ч}$; V – полный объем цистерны, м^3 .

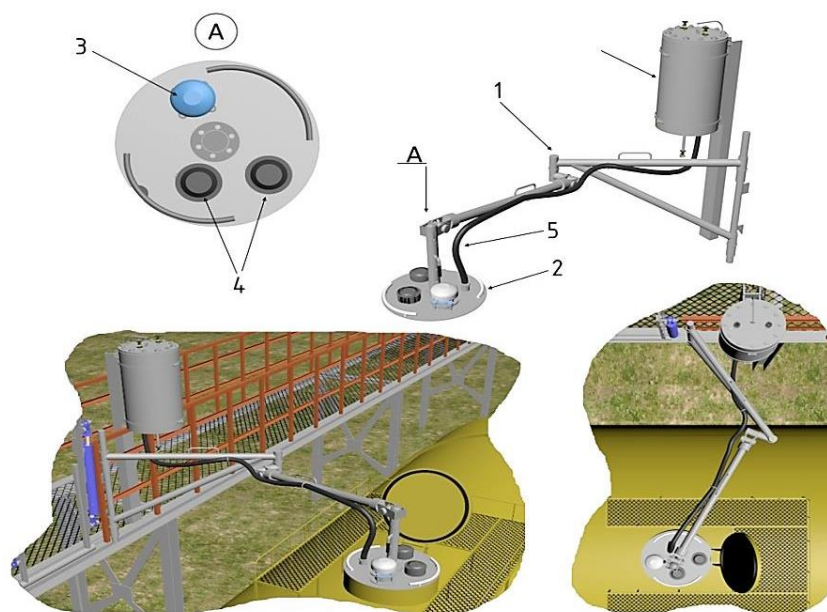


Рис. 4. Модель стационарного устройства герметизации цистерн

На территории г. Хабаровска эксплуатируются участки выгрузки, осуществляющие принудительный слив нефтепродуктов центробежными насосами различной производительности. В этой связи подбор впускного клапана для УГЦ должен выполняться индивидуального с учетом технических характеристик оборудования.

Участок выгрузки г. Хабаровска, взятый в качестве примера, оснащен центробежным насосом производительностью $55 \text{ м}^3/\text{ч}$. Полный объем железнодорожной цистерны также зависит от ее типа. Для проведения расчета можно принять наиболее часто используемую цистерну 66-го типа с объемом 80 м^3 . Тогда, подставляя значения в формулу (3), получаем пропускную способность Q , равную $73 \text{ м}^3/\text{ч}$. Поступающий в цистерну воздух образует ПВС, которая через шланг отвода паров вытесняется в адсорбер, где поглощается адсорбентом. По завершении выгрузки, УГЦ переводится обратно в гаражное положение. Преимущество заявляемого решения обеспечено его назначением, т.е. герметизацией железнодорожной цистерны при выполнении выгрузки ННГ, за счет чего выбросы загрязняющих веществ в атмосферу практически исключены.

Кроме того, сравнительная простота исполнения и легкость конструкции позволяет выполнять манипуляции с устройством без особых усилий, а наличие лючков обслуживания, в свою очередь, дает возможность снизить выбросы загрязняющих веществ, происходящих в ходе обслуживания цистерн.

Выводы

Негативное влияние на окружающую среду, оказываемое в рамках выгрузки нефтеналивных грузов, обеспечено присутствием периодических и постоянных источников загрязнения. Постоянно действующим источником такого воздействия отмечаются выбросы загрязняющих веществ, происходящие через открытые люки железнодорожных цистерн при их опорожнении.

Анализ существующих методов защиты от выбросов доказал, что наиболее подходящим методом сокращения выбросов является улавливание паров с последующей их адсорбцией. Для реализации данного метода на сливных эстакадах предложено использование адсорбера, монтируемого стационарно на металлоконструкцию эстакады, при этом отвод паров до адсорбера осуществляется посредством специализированного устройства герметизации, устанавливаемого на люк железнодорожной цистерны.

Экспериментальная оценка эффективности предлагаемого решения продемонстрировала сокращение выбросов загрязняющих веществ, снизив концентрацию паров ниже предельно-допустимого значения. Измеренная остаточная концентрация углеводородов внутри котла цистерны показала незначительный уровень в верхней части котла и превышение концентрации на последующих двух уровнях.

В ходе эксперимента допущено, что оставшаяся паровоздушная смесь может быть запечатана в котле цистерны после ее опорожнения и увезена на участок отгрузки, где впоследствии будет удалена через штатную организованную систему отвода, предусмотренную на наливных эстакадах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. : указ Президента РФ от 19.04.2017 г. № 176. URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (дата обращения: 14.02.2025).
2. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г. : указ Президента РФ от 7.04.2024 г. № 309. URL : <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73986> (дата обращения: 14.02.2025).
3. Анненков А.В. Оптимизация перевозок нефтеналивных грузов на железнодорожном транспорте. Москва : ВИНТИ РАН, 1999. 154 с.
4. Никулин А.А., Медов М.В., Кошкарров Р.В. Подходы к прогнозированию негативного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду // Universum: технические науки. 2021. № 4-1(85). С. 18–22.
5. New Report: Concerns Remain Over Safety of Rail to Transport Energy Liquids and Gases. URL : <https://www.nationalacademies.org/news/2017/10/concerns-remain-over-safety-of-rail-to-transport-energy-liquids-and-gases> (дата обращения: 07.01.2025).
6. Концепция новой государственной программы повышения безопасности перевозок опасных грузов / В.И. Медведев, М.Д. Сурков, Ю.А. Танайно, И.О. Тесленко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(58). С. 23–32.
7. К вопросу об источниках загрязняющего воздействия отгрузки нефтепродуктов при их перевозке железнодорожным транспортом / О.С. Кузьмин, А.Н. Луценко, Е.С. Куликова, А.З. Ткаченко // Транспортное дело России. 2024. № 2. С. 237–240. EDN: IBUPGB.
8. Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума : приказ Министерства транспорта РФ от 29 июля 2019 г. № 245 (зарегистрирован 07.02.2020 г. № 57458). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202002100022> (дата обращения: 14.02.2025).
9. Коршак А.А., Кулагин А.В. Методика расчета потерь бензинов из подземных горизонтальных резервуаров АЗС // Нефтегазовое дело. 2003. № 1. EDN: TWWLCD.
10. Коршак С.А. Совершенствование методов расчета потерь бензинов от испарения из резервуаров типов РВС и РВСП : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / Коршак Сергей Алексеевич. Уфа, 2003. 174 с. EDN: NMNPMJ.

REFERENCES

1. Ob utverzhdenii strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federatsii na period do 2025 g. [On Approval of the Strategy of Environmental Security of the Russian Federation for the period until 2025] : ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 19.04.2017 g. № 176. URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (data obrashcheniya: 14.02.2025).
2. O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossijskoj Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do2036 g. [On the national development goals of the Russian Federation for the period of 2030 and in perspective up to 2036] : ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 7.04.2024 g. № 309. URL : <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73986> (data obrashcheniya: 14.02.2025).
3. Annenkov A.V. Optimizatsiya perevozok neftenalivnykh грузов na zheleznodorozhnom transporte [Optimization of oil cargoes transportation on railway transport]. Moskva : VINITI RAN, 1999. 154 s.
4. Nikulin A.A., Medov M.V., Koshkarov R.V. Podkhody k prognozirovaniyu negativnogo vliyaniya zheleznodorozhnogo transporta na okruzhayushchuyu sredu [Approaches to the forecasting of the negative influence of the railway transportation on the environment] // Universum: tekhnicheskkiye nauki. 2021. № 4-1(85). S. 18–22.
5. New Report: Concerns Remain Over Safety of Rail to Transport Energy Liquids and Gases. URL : <https://www.nationalacademies.org/news/2017/10/concerns-remain-over-safety-of-rail-to-transport-energy-liquids-and-gases> (data obrashcheniya: 07.01.2025).
6. Kontsepsiya novoy gosudarstvennoy programmy povysheniya bezopasnosti perevozok opasnykh грузов [The concept of the new state program to improve the safety of dangerous goods transportation] / V.I. Medvedev, M.D. Surkov, Y.A. Tanaino, I.O. Teslenko // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. № 3(58). S. 23–32.
7. K voprosu ob istochnikakh zagryaznyayushchego vozdejstviya otgruzki nefteproduktov pri ikh перевозке zheleznodorozhnym transportom [To the question about the sources of polluting effect of oil products shipment during their transportation by rail] / O.S. Kuzmin, A.N. Lutsenko, E.S. Kulikova, A.Z. Tkachenko // Transportnoye delo Rossii. 2024. № 2. S. 237–240. EDN: IBUPGB.
8. Ob utverzhdenii Pravil perevozok zheleznodorozhnym transportom грузом наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума [On Approval of the Rules for Carriage by Rail of Cargoes in Bulk in Tank Wagons and Bunker Wagons for Transportation of Oil Bitumen] : prikaz Ministerstva transporta RF ot 29 iyulya 2019 g. № 245 (zaregistrovan 07.02.2020 g. № 57458). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202002100022> (data obrashcheniya: 14.02.2025).
9. Korshak A.A., Kulagin A.V. Metodika rascheta poter' benzinov iz podzemnykh gorizonta'nykh rezervuarov AZS [Methodology of calculation of gasoline losses from underground horizontal tanks of filling stations] // Neftegazovoye delo. 2003. № 1. S. 10. EDN: TWWLCD;
10. Korshak S.A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta poter' benzinov ot ispareniya iz rezervuarov tipov RVS i RVSP [Improvement of methods of calculation of gasoline losses from evaporation from tanks of RVS and RVSP types] : dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk : spetsial'nost' 25.00.19 «Stroitel'stvo i ekspluatatsiya neftegazoprovodov, baz i khranilishch» / Korshak Sergey Alekseevich. Ufa, 2003. 174 s. EDN: NMNPMJ.

Информация об авторах

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

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

Е.С. Куликова – старший преподаватель Высшей школы транспортного строительства, землеустройства и геодезии.

Information about the authors

O.S. Kuzmin – Postgraduate Student, Department of Technosphere Safety;

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

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

Статья поступила в редакцию 14.01.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2025; принята к публикации 20.01.2025.

The article was submitted: 14.01.2025; approved after reviewing: 20.01.2025; accepted for publication: 20.01.2025.

Научная статья
УДК 656.073
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-94-101

ОРГАНИЗАЦИЯ ОПОРНОГО МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Ольховиков Сергей Эдуардович¹, Петренева Елена Алексеевна²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

¹ smot@mail.ru

² petreneva.ea@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы организации опорного мультимодального транспортно-логистического центра (МТЛЦ) в Дальневосточном федеральном округе. События 2022 г. усилили тренд на переориентирование транспортных потоков с запада на восток и юг. Наиболее ёмким оказалось восточное направление – именно через страны Азиатско-Тихоокеанский региона осуществляются основные цепи поставок в рамках параллельного импорта, а также реализуется экспортный потенциал Российской Федерации. Растет необходимость в развитии и наращивании мощностей логистической инфраструктуры, изменении внутренней работы транспортных узлов, организации новых МТЛЦ. Обоснована необходимость строительства опорного распределительного МТЛЦ на территории Хабаровского края.

Ключевые слова: мультимодальные транспортно-логистические центры, Дальневосточный федеральный округ, транспортно-логистические услуги, мультимодальные перевозки, Дальний Восток, Азиатско-Тихоокеанский регион, транспортная инфраструктура, товаропоток, инвестиционный проект, транспортный узел

Original article

ORGANIZATION OF A SUPPORTING MULTIMODAL TRANSPORT AND LOGISTICS CENTER IN THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

Olkhovikov Sergey E.¹, Petreneva Elena A.²

^{1,2} Siberian transport university, Novosibirsk

¹ smot@mail.ru

² petreneva.ea@mail.ru

Abstract. The issues of organizing a reference multimodal transport and logistics center (MTLC) in the Far Eastern Federal District are considered. The events of 2022 have intensified the trend towards reorientation of traffic flows from the west to the east and south. The eastern direction turned out to be the most capacious – it is through the countries of the Asia-Pacific region that the main supply chains are carried out within the framework of parallel imports, as well as the export potential of the Russian Federation is realized. There is a growing need to develop and increase the capacity of the logistics infrastructure, change the internal work of transport hubs, and organize new MTLCs. The necessity of building a basic distribution center in the territory of the Far East region is justified.

Keywords: multimodal transport and logistics centers, Far Eastern Federal District, transport and logistics services, multimodal transportation, Far East, Asia-Pacific region, transport infrastructure, commodity flow, investment project, transport hub

Введение

Практически все долгосрочные программы экономического развития краев и областей Дальневосточного федерального округа выделяют один приоритет: Дальний Восток – мощный транзитно-транспортный узел. Чтобы реализовать его, у России на данный момент есть главное – «ворота» в Азиатско-Тихоокеанский регион. Доступ на просторы Мирового океана – важное конкурентное преимущество для любой территории.

В настоящее время важной частью организации перевозки являются такие процедуры, как перевалка, хранение груза, таможенное оформление и дру-

гие, которые можно реализовать посредством строительства мультимодальных транспортно-логистических центров за пределами портов. Логистические центры позволяют обеспечить взаимосвязь путей сообщения своевременной организацией и предоставлением в полном объеме транспортно-логистических услуг.

Основная часть

В последние несколько лет ситуация в российской экономике остаётся нестабильной: пандемийные ограничения и антироссийские санкции, под которые попали предприятия из различных сфер

деятельности, несомненно, оказали свое влияние. Несмотря на сложности, связанные с построением новых логистических цепочек, заполненность складских терминальных площадей остаётся достаточно высокой. Появление объекта МТЛЦ в таких условиях наиболее целесообразно. Комплекс поможет в организации полного цикла доставки грузов, а при необходимости – обеспечит мощности для их хранения. При этом главной целью станет снижение общего уровня логистических издержек [6].

На данный момент современный МТЛЦ – это транспортно-экспедиционное предприятие, выполняющее полный спектр услуг и представляющее собой комплекс инженерно-технических сооружений с современным оборудованием, размещаемый в крупных узлах транспортной сети.

Дальний Восток, с учетом его геополитического значения как транспортного «моста» между Россией и странами Азиатско-Тихоокеанского региона, обладает большими перспективами для создания МТЛУ.

Прежде всего, следует учитывать, что мультимодальные транспортно-логистические центры национального масштаба должны координировать работу двух и более видов транспорта, т.е. быть мультимодальными в прямом и наиболее широком смысле этого понятия. Такие центры национального уровня необходимо связать в единую систему. Через них будет проходить основной поток товаров международного и межрегионального сообщения, а также товаропоток, требующий мультимодальных перевозок.

Дальний Восток особенно нуждается в строительстве таких МТЛЦ. Одной из причин такой необходимости является переориентация большого потока грузоперевозок на Восток, в связи с введенными санкциями в отношении России. Ввиду близости Дальневосточного федерального округа к морю расположение МТЛЦ в данной местности является возможным, а такие виды транспорта, как железнодорожный и автомобильный, должны обязательно взаимодействовать на территории построенного МТЛЦ. Однако порты Дальнего Востока перегружены и с трудом справляются с непрерывно поступающими контейнеро- и поездопотоками. Создание новых МТЛЦ на приграничных территориях восточных партнеров позволит перенаправить туда большие потоки грузов, что разгрузит порты, а также систематизирует работу по перевалке, складированию, экспедированию, таможенному оформлению и другим вышеперечисленным процедурам в полном объеме [1].

Необходимо учитывать, что каждый город имеет свои специфические особенности, поэтому развитость транспорта и транспортной инфраструктуры в городах различна. Из этого следует, что при формировании мультимодального центра в каждом конкретном городе необходимо ориентироваться на входящие и исходящие транспортные потоки.

На территории Дальнего Востока предпосылки для формирования МТЛЦ имеются в пяти региональных областях. Данные субъекты выбраны не случайно: на их территории расположены пограничные переходы с восточными партнерами, вследствие этого уже планируется реализация проектов МТЛЦ в некоторых городах и поселках – именно там намечается рост и концентрация мощного грузопотока.

По выбранным городам и поселкам был произведен критериальный анализ целесообразности строительства МТЛЦ, и по результатам оценки можно сделать вывод, что такие города, как Забайкальск, Биробиджан, посёлок Пограничный и село Невское, будут исключены для проведения дальнейших расчетов.

Во-первых, повлиял такой критерий, как наличие свободных земель. Проектируемый МТЛЦ будет иметь площадь от 40 Га и выше, а близость земли к полосе отвода железной дороги – обязательный пункт при выборе месторасположения комплекса, так как для Востока России железнодорожный транспорт – стратегически важный элемент связанности территории.

Во-вторых, Хабаровск, являясь столицей субъекта, оказывает огромное влияние на формирование транспортно-логистических связей всего Приамурья, обслуживание быстро растущей экономики Хабаровского края (территории опережающего развития).

В-третьих, нельзя не отметить, что на данных территориях уже имеются терминальные мощности, что нельзя сказать о Хабаровске, транспортный узел которого – один из самых грузонапряженных не только на Дальнем Востоке, но и во всей стране.

Таким образом, в выборе оптимального местоположения мультимодального транспортно-логистического центра будут рассмотрены площадки в Хабаровске.

Для поиска оптимального места размещения МТЛЦ, помимо критериального метода, описанного ранее, будет использоваться метод частичного перебора, который поможет наиболее эффективно решить поставленную задачу [2] и предполагает наличие следующих исходных данных:

- 1) направления доставки (от крупных предприятий-клиентов);
- 2) объёмов поставок продукции;
- 3) расстояния от предприятия-клиента до планируемого МТЛЦ.

Расчёт производится в следующей последовательности. Выбирается железнодорожная станция в рассматриваемом узле транспортной сети, в котором возможно размещение логистического центра. Затем определяются расстояния от этих станций до каждого клиента. По итогам умножения величины расстояния на величину объема поставки клиента получается грузооборот транспорта по доставке, при этом суммарный грузооборот транспорта каждой станции сравнивается

между собой. Узел транспортной сети, обеспечивающий минимальный грузооборот транспорта, и будет искомым местом размещения МТЛЦ.

Ранее критериальный анализ помог выявить наиболее актуальную на данный момент территорию для рассмотрения строительства МТЛЦ, а именно – город Хабаровск, где были выбраны две железнодорожные станции: грузовая станция, расположенная на западном въезде в Хабаровск (Западная станция), и грузовая станция на восточном въезде в Хабаровск (Восточная станция), по основному назначению и характеру работы являющиеся грузовыми и имеющиеся в относительной близости свободные участки под строительство МТЛЦ.

Поиск участков производился при помощи публичной кадастровой карты. В Хабаровске имеется 4 участка под строительство объекта, обладающих рядом особенностей (табл. 1), анализ которых помог выбрать две площадки для дальнейшего рассмотрения, а именно – участки 2 и 4. Выбор обусловлен явными преимуществами рассматриваемых участков. При этом недостаток участка 2, а именно площадь в 18 Га (при минимально планируемой площади в 40 Га) значительно «проигрывает» по данному критерию участку 4. Однако целесообразность строительства и окончательного выбора будет решаться с помощью описанного ранее метода частичного перебора.

Первоначально необходимо рассмотреть направления доставки и указать, чем обусловлен выбор. Доставка грузов до планируемого МТЛЦ будет осуществляться из следующих выбранных городов:

1) из Комсомольска-на-Амуре (выбор обусловлен маршрутом, пролегающим через Байкало-Амурскую магистраль);

2) из Советской Гавани (выбор обусловлен наличием на территории морского пункта пропуска, а также маршрутом, пролегающим через Байкало-Амурскую магистраль);

3) из Владивостока (выбор обусловлен близостью к железнодорожному погранпереходу Гродеково–Суйфэньхэ в сторону восточных партнеров, а также маршрутом, пролегающим через Транссибирскую магистраль с востока России);

4) из Находки (выбор обусловлен наличием на территории морского пункта пропуска);

5) из Иркутска (выбор обусловлен маршрутом, пролегающим через Транссибирскую магистраль с запада России).

Исходя из результатов произведенного расчёта грузооборота станций транспортного узла Хабаровска можно сказать, что свободный земельный участок 4 вблизи Восточной станции будет наиболее рациональным местом размещения МТЛЦ, так как здесь обеспечивается меньший грузооборот железнодорожного транспорта относительно Западной станции. Таким образом, создание в Хабаровском транспортном узле крупного опорного МТЛЦ международного уровня поспособствует реализации транзитного потенциала Дальневосточного федерального округа, расширению устойчивых торгово-экономических связей со странами АТР.

Эксплуатационными характеристиками мультимодального транспортно-логистического центра являются его перерабатывающая способность, оснащение и вместимость складов, площадок, административных помещений и многое другое. К технологическим же характеристикам в основном относят временные затраты на обслуживание поступающих грузопотоков, включая приём, обработку, оформление документов и все последующие операции с грузом [3].

Таблица 1

Анализ особенностей рассматриваемых участков вблизи Западной и Восточной станций

Рассматриваемый участок		Особенности участка
Западная станция	Участок 1	<i>Преимущества:</i> координация работы железнодорожного, автомобильного и водного транспорта <i>Недостатки:</i> – крайне маленькая площадь участка (около 8 Га) – расположение участка на территории моста, который создает значительные неудобства для строительства объекта, вследствие чего уменьшается его площадь
	Участок 2	<i>Преимущества:</i> – примыкание участка к полосе отвода железной дороги – возможность координации работы железнодорожного и автомобильного транспорта <i>Недостатки:</i> площадь участка меньше планируемой (18 Га)
Восточная станция	Участок 3	<i>Преимущества:</i> – непосредственная обработка поступающих грузов по железной дороге – минимально необходимая площадь объекта (около 43 Га) <i>Недостатки:</i> – невозможность осуществления автоподвоза / вывоза груза в связи с расположением участка между железнодорожными путями – координация работы только железнодорожного транспорта
	Участок 4	<i>Преимущества:</i> – относительно большая площадь участка, необходимого под строительство (более 70 Га) – возможность расположения на данной территории разных инфраструктурных объектов МТЛЦ – имеется примыкание к полосе отвода железной дороги <i>Недостатков</i> не выявлено

На рис. 1 представлен комплекс ключевых услуг, выполняемых на территории МТЛЦ.

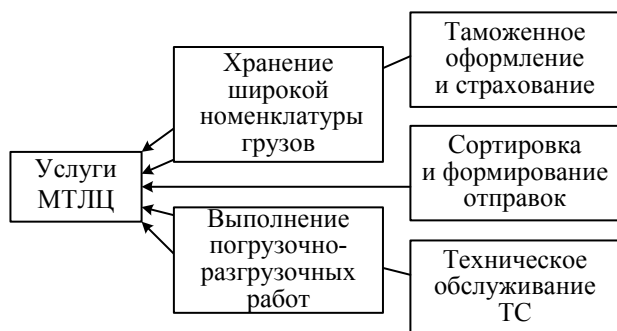


Рис. 1. Ключевые услуги, выполняемые на территории МТЛЦ

Перечень услуг такого центра может быть различным, однако, все они должны обеспечивать выполнение самой важной функции – организации доставки грузов до клиента в назначенные сроки наиболее оптимальным маршрутом [4].

Техническое обеспечение МТЛЦ характеризуется прежде всего общей площадью, на которой будут располагаться следующие объекты с необходимым техническим оборудованием:

- 1) терминал со специализированными складскими помещениями для хранения и переработки грузов;
- 2) таможенный пост (постоянная зона таможенного контроля (ПЗТК), склад временного хранения (СВХ) (открытого типа (площадка) и закрытого типа (склад)));
- 3) контрольно-пропускной пункт;
- 4) административные помещения;
- 5) торговые представительства и бизнес-центры;
- 6) станция технического обслуживания транспортных средств и др.

Большую территорию займет именно складской комплекс МТЛЦ, который должен быть универсальным и обеспечивать нормативные требования к хранению и складской обработке всех видов поступающих грузов. При этом площадки следует оснастить всем необходимым для краткосрочного и длительного хранения грузов (на открытых и закрытых площадках), с учетом необходимости хранения грузов, требующих специального температурного режима и уровня влажности [5]. При этом технологическое обеспечение представлено организацией процессов, реализуемых непосредственно в самих МТЛЦ.

Этапы технологического процесса обработки груза в МТЛЦ.

I. Прибытие подвижного состава (ПС) на разгрузку

II. Разгрузка ПС и приемка поступившего груза

III. Сверка и оформление сопроводительных документов, актов приемки груза и другой необходимой документации

IV. Размещение груза на складское хранение

V. Хранение груза и обеспечение соответствующих для этого условий

VI. Организация дальнейшего перемещения груза, в том числе оформление документов на отгрузку

VII. Прибытие и постановка ПС на загрузку

VIII. Выдача груза с хранения

IX. Загрузка ПС и его убытие с грузом

Каждый этап детально проработан и включает в себя более обширный перечень функций, который помогает в создании единой методологии технического и технологического оснащения МТЛЦ, позволяющей эффективно принимать решения на всех стадиях обработки грузопотоков.

Мультимодальный транспортно-логистический центр в Хабаровске должен иметь всю необходимую складскую, таможенную, терминальную и прочую инфраструктуру, обеспечивающую быстрый и качественный логистический сервис международного уровня. По результатам расчетов с использованием объектов-аналогов в реализацию этого проекта в общей сложности планируется вложить около 6 млрд руб. В табл. 2 представлены этапы и сроки реализации проекта строительства МТЛЦ.

Таблица 2

Этапы и сроки реализации проекта строительства МТЛЦ

Этапы	Сроки
1. Регистрация организации, оформление документов	2 месяца
2. Покупка земельного участка	1 месяц
3. Проектные работы	2 месяца
4. Согласование проекта и получение разрешительной документации	1 месяц
5. Организация помещения основного склада	10 месяцев
6. Приобретение необходимого оборудования и машин	2 месяца
7. Организация офисных помещений	2 месяца
8. Организация зоны погрузочно-разгрузочных работ	1 месяц
9. Организация работы по привлечению клиентов	Весь период
10. Прочие затраты	Весь период

Таким образом, расчетный срок реализации проекта (с учетом выполнения части этапов параллельно) составит около двух лет, фактические сроки (с учетом геополитической обстановки в стране) могут растянуться на 3-4 года. Данный МТЛЦ станет частью масштабного проекта «Сухой порт» и разместится в районе железнодорожной Восточной станции. Такой центр позволит не только оптимизировать перемещение экспортно-импортных грузопотоков через порты Дальнего Востока, но и способствовать загрузке Транссибирской магистрали в обратном направлении.

Активное участие в создании МТЛЦ примет железная дорога, по которой в 2022 г. перевезено 6 млн 521,1 тыс. груженых и порожних контейнеров

ДФЭ (TEU), что на 0,3 % больше, чем за 2021 г. Во внутреннем сообщении отправлено 2 млн 545,5 тыс. ДФЭ (+3,1 %).

Появление такого объекта позволит освободить занятые в настоящее время погрузочные площади Восточной станции. В перспективе комплекс свяжется с будущим международным транспортным коридором на БУ острове, где должен разместиться грузопассажирский пункт пропуска из России к восточным партнерам и обратно. Поэтому в дальнейшем спрос на логистические услуги дополнится спросом со стороны зарубежных компаний – в первую очередь, из стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Хабаровский край является одной из наиболее развитых в экономическом отношении территорий Дальнего Востока, его экономика базируется на мощном промышленном производстве и транспортном обслуживании магистральных грузопотоков, что формирует важное конкурентное преимущество региона. Таким образом, Хабаровский край – центр транспортной системы Дальнего Востока России.

В настоящее время данный регион – наиболее важный пункт пропуска грузопотоков как назначением в порты Приморья и погранпереходы в страны АТР, так и из них. Строительство МТЛЦ вблизи сортировочной Восточной станции позволит сосредоточивать пропуск большой номенклатуры грузов через его территорию в направлении Приморского края, а далее – стран АТР.

На данный момент большие потоки грузоперевозок сконцентрированы именно на Востоке страны, и главный ориентир – сотрудничество в долгосрочной перспективе со странами АТР. Концентрация экспортно-импортных маршрутов приходится именно на Хабаровск, в связи с чем сортировочная Восточная станция начала хуже справляться с переработкой грузов. Проект МТЛЦ поможет в первую очередь перенаправить определённый объём грузопотоков с Восточной станции непосредственно в сам МТЛЦ, где будут производиться необхо-

димые услуги по переработке, хранению грузов, а также иные услуги, которыми оперирует комплекс.

Так как ввод в эксплуатацию МТЛЦ планируется только через несколько лет, стоит отметить, что представленная далее диаграмма будет учитывать определённый процент прироста грузопотоков. Президент Российской Федерации заявил, что грузопотоки должны увеличиться на треть по восточному направлению к 2025 г. Согласно официальному сайту Росстата на диаграмме (рис. 2), показан объём годового фактического и планируемого грузопотока через Восточную станцию в тоннах.

Большую часть грузопотоков составляют именно контейнеропотоки, связано это напрямую с переориентацией грузов на маршруты через порты Дальнего Востока и сухопутные погранпереходы на КНР, что ведет к значительному увеличению контейнеропотока через Восточный полигон. Мультимодальный транспортно-логистический центр Хабаровска сможет пропускать через свою территорию большую долю объёма грузопотоков (рис. 2).

В настоящее время при проектировании и строительстве мультимодальных транспортно-логистических центров первоначально учитывается возможность получения доходов в будущем от эксплуатации объекта и оказания (продаж) складских, логистических и иных услуг [7]. МТЛЦ Хабаровска располагается в непосредственной близости с железнодорожным путем общего пользования, что в свою очередь предполагает оказание полного перечня складских и терминальных услуг с вагонами и контейнерами. При этом большую часть вагоно- и контейнеропотоков будут составлять экспортные и импортные грузы, проходящие через территорию Хабаровска, что должно сопровождаться необходимым оформлением документов. Мультимодальные перевозки предполагают использование как минимум двух видов транспорта, а значит, услуги по перевалке грузов с одного вида транспорта на другой также должны производиться в данном комплексе.

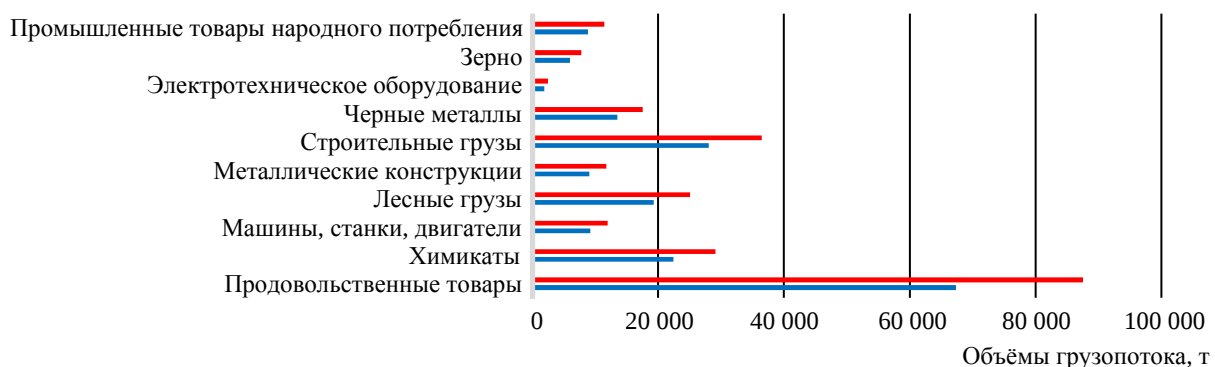


Рис. 2. Объёмы годового фактического и планируемого грузопотока через станцию Z: ■ – план до 2025 г.; ■ – факт на 2023 г.

Конечная стоимость организации полной грузоперевозки будет зависеть от большого числа факторов, например, от вида и веса груза, пункта отправления и назначения, логистической схемы (использования одного или нескольких видов транспорта), необходимости оказания услуг по хранению, оформлению документов и много другого. Данные факторы повлияют как на увеличение, так и на уменьшение тарифа грузоперевозки. Взаимодействовать требуется с каждым конкретным клиентом, который предоставит свои условия на совершение той или иной перевозки, а значит, и организация должна происходить по договорным тарифам [8].

Динамика основных экономических показателей проекта МТЛЦ напрямую зависит от динамики инвестиций. При этом ключевым вопросом будет являться оценка будущих денежных потоков. Чтобы сопоставить эти потоки, их необходимо привести к одному времени по ставке дисконтирования [9].

С математической точки зрения, ставка дисконтирования – это процентная ставка для пересчета будущих денежных доходов в единую величину текущей стоимости, являющуюся базой для определения рыночной стоимости предприятия. С экономической точки зрения ставкой дисконтирования называют требуемую инвесторами ставку дохода по имеющимся альтернативным вариантам инвестиций с сопоставимым уровнем риска [10].

В целом данная ставка позволяет оценить доходность будущих инвестиций. Ставка дисконтирования определяется по формуле

$$r = r_f + r_p + I,$$

где r_f – ставка доходности безрисковых активов, %; r_p – премия за риск, %; I – процент инфляции, %.

По ставке доходности безрисковым активом считают такой актив, риск от потерь которого близок к нулю. Данная ставка сопоставляется с ключевой ставкой Центрального Банка Российской Федерации, по которой он кредитует и выдает займы другим банкам. С 25 октября 2024 г. и на момент подготовки статьи ключевая ставка ЦБ РФ составляла 21 %. Годовая инфляция по данным Росстата в настоящее время – 7,42 %.

Премия за риск – дополнительный доход, выплачиваемый инвестору сверх того уровня, который может быть получен по безрисковым операциям. Данный показатель будет определяться методом экс-

пертной оценки, предполагающим оценку всех возможных рисков. На практике премия за риск определяется непосредственно самим инвестором.

Инвестором может выступать компания, готовая вложить свои средства в строительство такого крупного объекта, как МТЛЦ, принимать участие в проработке «идеальной» модели работы комплекса для достижения лучших результатов. Инвестор может рассчитывать на поддержку ОАО «РЖД», Министерства транспорта РФ и правительства Хабаровского края, которые заинтересованы в создании опорной сети объектов МТЛЦ. В табл. 3 представлены возможные риски и их поправки в процентах.

Таблица 3

Метод экспертной оценки премии за риск

Вид риска	Премия, %
Несоблюдение сроков реализации инвестиционного проекта	3
Повышение бюджета инвестиций	3
Отсутствие востребованности услуг МТЛЦ со стороны предприятий	1
Рентабельность проекта	3
Прочие особые риски	2
Итого	12

Таким образом, ставка дисконтирования будет равна:

$$r = 21 \% + 12 \% + 7,42 \% = 40,42 \%$$

Ставка дисконтирования является составляющим элементом в определении чистого дисконтированного дохода (ЧДД). По такому показателю, как ЧДД, делается объективная оценка эффективности инвестиционных вложений. Чистый дисконтированный доход определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^n \frac{P_t}{(1+r)^n} - IC_0,$$

где P_t – входящий денежный поток в периоде t , руб.; r – ставка дисконтирования, %; n – продолжительность периода действия проекта, лет; IC_0 – первоначальные инвестиционные затраты, руб.

После проведенных расчетов можно сказать, что первоначальные инвестиции в проект МТЛЦ оцениваются примерно в 4 млрд руб. Укрупненные результаты расчётов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Объём капитальных вложений в проект МТЛЦ города Х

Наименование вложения	Примечания	Цена, тыс. руб.
1. Приобретение земельного участка	Площадь участка 704 024 м ²	450 435
2. Проведение инженерных изысканий	Выполнение геодезических, геологических и экологических инженерных изысканий для проектирования МТЛЦ	233 000
3. Разработка эскизного проекта	Разработка эскиза с целью общего представления о внешнем виде, планировке и расположении объекта строительства	3300
4. Строительство объектов Мультимодального транспортно-логистического центра	Стоимость 1 м ² объекта МТЛЦ оценивается в 8800 руб., планируется застроить больше половины площади участка складами и необходимыми сооружениями	3 555 411
Всего		4 242 146

Входящий денежный поток в первый год введения проекта МТЛЦ в эксплуатацию определялся следующим образом:

1) исходя из анализа услуг, предоставляемых МТЛЦ Хабаровска, сначала была определена усредненная цена оказания центром одной стандартной грузоперевозки с использованием нескольких видов транспорта, хранения груза на складе комплекса в течение 5 дней и оформления необходимой документации;

2) далее полученное значение умножается на общий объём перевозимых грузов (за год);

3) после чего был произведён перерасчёт тарифа с учетом НДС и определён конечный примерный входящий денежный поток

$$P_t = 1530 \cdot 240\,600 + 1530 \cdot 240\,600 \cdot 0,2 = 441\,741\,600 \text{ руб.}$$

Заключение

Итак, из расчетных манипуляций можно сделать заключение о том, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) МТЛЦ Хабаровска примет положительное значение уже через 4 года и 10 месяцев (рис. 3) после ввода в эксплуатацию, что, безусловно, говорит об эффективности инвестиционных вложений в строительство комплекса.

Однако не стоит забывать, что рассмотрена лишь коммерческая (финансовая) сторона вопроса, поэтому срок выхода проекта на положительный ЧДД будет отличаться и предположительно покажет такой результат уже через 3 года. Реализация инвестиционного проекта строительства опорного МТЛЦ в первую очередь предполагает организацию взаимодействия технических и технологических характеристик проектируемого комплекса. Помочь в такой организации может четкий план инвестиционных вложений.

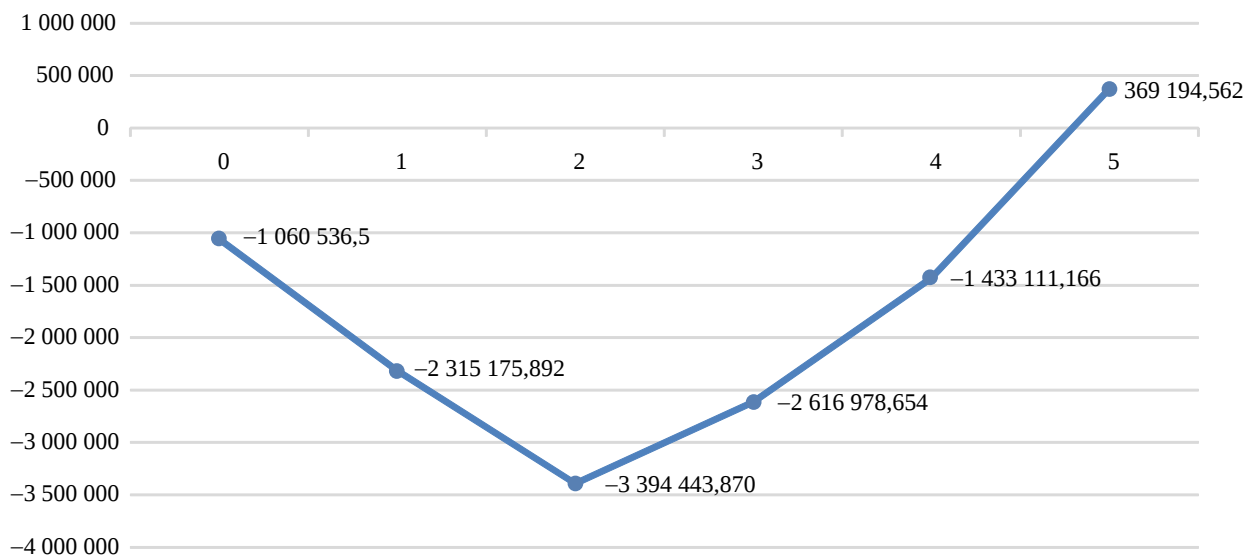


Рис. 3. Расчёт ЧДД и срока окупаемости инвестиций в проект строительства МТЛЦ

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грефенштейн А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1(60). С. 68-75.
2. Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С.Э. Ольховиков, Е.А. Петренева, И.Н. Кагадий, О.Б. Шерстобитова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(89). С. 106-118. doi:10.46973/0201-727X_2023_1_106
3. Бондаренко Е.М. Анализ возможных путей развития новых логистических технологий в современных условиях // Мировые исследования в области естественных и технических наук : материалы VI Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 30 апреля 2023 г. Ставрополь : Общество с ограниченной ответственностью «Ставропольское издательство «Параграф»», 2023. С. 140–141.
4. Пугачев И.Н., Король Р.Г., Нестерова Н.С. Развитие транспортно-логистического комплекса Дальневосточного региона России // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 4(33). С. 25–34.
5. Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О., Ольховиков С.Э. Организация ускоренных контейнерных поездов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 2(35). С. 48–55.
6. Король Р.Г., Акельев А.С. Проектирование динамической имитационной модели мультимодальной транспортно-логистической системы Дальнего Востока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 4(37). С. 43–50.

7. Грешенштейн А.П., Журина Е.В., Петренева Е.А. Обзор средств обеспечения приоритетных условий движения общественного транспорта на перекрестках // Политранспортные системы : материалы XII Международной научно-технической конференции. Новосибирск, 21–22 сентября 2022 г. В 3 ч. Ч. 3. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 217–223.
8. Псеровская Е.Д., Ким А.С. Услуга «грузовой экспресс» как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2(53). С. 37–45.
9. Петренева Е.А. Контейнерные перевозки как метод логистического подхода // Известия Транссиба. 2024. № 1(57). С. 105–115.
10. Ольховиков С.Э., Петренева Е.А. Анализ возможности организации зернового хаба на территории Новосибирской области // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4. С. 101–111.

REFERENCES

1. Grefenshtein A.P. Obosnovanie tselesoobraznosti sozdaniya raspredelitel'nogo tsentra v usloviyakh vzaimodeystviya raznykh vidov transporta [Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2022. № 1(60). S. 68–75.
2. Formirovaniye uzlovykh multimodalnykh transportno-logisticheskikh tsentrov [Formation of junction multimodal transport and logistics centers] / S.E. Olkhovikov, E.A. Petreneva, I.N. Kagadiy, O.B. Sherstobitova // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2023. № 1. S. 106–118. doi:10.46973/0201-727X_2023_1_106
3. Bondarenko E.M. Analiz vozmozhnykh putey razvitiya novykh logisticheskikh tekhnologiy v sovremennykh usloviyakh [Analysis of possible ways of development of new logistics technologies in modern conditions] // Mirovye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk : materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii, Stavropol, 30 aprelya 2023 g. Stavropol : Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvenost'yu "Stavropol'skoye izdatel'stvo «Paragraph». 2023. S. 140–141.
4. Pugachev I.N., Korol R.G., Nesterova N.S. Razvitiye transportno-logisticheskogo kompleksa Dalnevostochnogo regiona Rossii [Development of transport and logistics complex of the Far Eastern regions of Russia] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2022. № 4(33). S. 25–34.
5. Grishkova D.Y., Teslenko I.O., Olkhovikov S.E. Organizatsiya uskorennykh kontejnernykh poezdov [Organization of accelerated container trains] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2023. № 2(35). S. 48–55.
6. Korol R.G., Akeliev A.S. Proektirovaniye dinamicheskoy imitatsionnoy modeli multimodalnoy transportno-logisticheskoy sistemy Dalnego Vostoka [Designing a dynamic simulation model of a multimodal transport and logistics system of the Far East] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2023. № 4(37). S. 43–50.
7. Grefenstein A.P., Zhurina E.V., Petreneva E.A. Obzor sredstv obespecheniya prioritnykh uslovij dvizheniya obshchestvennogo transporta na perekrestkakh [Review of means of ensuring priority conditions of public transport at intersections] // Politransportnye sistemy : materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Novosibirsk, 21–22 sentyabrya 2022 g. V 3 ch. Ch. 3. Novosibirsk : Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2022. S. 217–223.
8. Pserovskaya E.D., Kim A.S. Usluga «gruzovoy ekspress» kak sposob povysheniya konkurentosposobnosti zheleznodorozhnogo transporta [Application of Hot Shot Service as a Way to Increase Competitiveness of Railway Transport] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2020. № 2(53). S. 37–45.
9. Petreneva E.A. Kontrejlernye perevozki kak metod logisticheskogo podkhoda [Piggyback transportation as a method of logistic approach] // Izvestiya Transsiba. 2024. № 1(57). S. 105–115.
10. Olkhovikov S.E., Petreneva E.A. Analiz vozmozhnosti organizatsii zernovogo khaba na territorii Novosibirskoy oblasti [Analysis of the possibility of organizing a grain hub in the Novosibirsk region] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2023. № 4. S. 101–111.

Информация об авторах

С.Э. Ольховиков – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»;
Е.А. Петренева – преподаватель кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав».

Information about the authors

S.E. Olkhovikov – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock» Department;
E.A. Petreneva – Lecturer, «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock» Department.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 31.01.2025; принята к публикации 31.01.2025.
The article was submitted: 18.11.2024; approved after reviewing: 31.01.2025; accepted for publication: 31.01.2025.

Научная статья
УДК 656.259.12
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-102-107

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Тарасов Евгений Михайлович¹, Надежкин Вадим Александрович², Надежкина Снежана Андреевна³

^{1, 2, 3} Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара

¹ ats@samgups.ru

² vadim_nadezhkin@mail.ru

³ snezhana.sarycheva.97@mail.ru

Аннотация. Представлен анализ эффективности систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ) состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Рассмотрены современные подходы к диагностике, включая методы сбора и обработки данных, а также алгоритмы анализа состояния устройств ЖАТ. Особое внимание уделено оценке надежности и точности диагностических систем, а также их влиянию на безопасность и эффективность эксплуатации железнодорожного транспорта. Исследуются ключевые показатели, позволяющие оценить эффективность систем, такие как коэффициенты предотвращения отказов и время реакции на возникновение неисправностей. Подчеркивается важность технической диагностики и мониторинга в обеспечении безопасности и надежности автоматизации процессов железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: отказы, классификаторы состояний, диагностика и мониторинг, техническое обслуживание, машинное обучение

Original article

ANALYSIS OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF TECHNICAL DIAGNOSTICS AND MONITORING SYSTEMS FOR RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS DEVICES

Tarasov Evgeny M.¹, Nadezhkin Vadim A.², Nadezhkina Snezhana A.³

¹ Volga State Transport University, Samara

¹ ats@samgups.ru

² vadim_nadezhkin@mail.ru

³ snezhana.sarycheva.97@mail.ru

Abstract. The article presents an analysis of the efficiency of systems for technical diagnostics and monitoring of the condition of railway automation and telemetry devices. Modern approaches to diagnostics are considered, including methods for collecting and processing data, as well as algorithms for analyzing the condition of automation and telemetry devices. Particular attention is paid to assessing the reliability and accuracy of diagnostic systems, as well as their impact on the safety and efficiency of rail transport operation. Key indicators that allow assessing the efficiency of systems are studied, such as failure prevention rates and response time to faults. The authors emphasize the importance of technical diagnostics and monitoring in ensuring the safety and reliability of automation of rail transportation processes.

Keywords: failures, condition classifiers, diagnostics and monitoring, maintenance, machine learning

Введение

В современных условиях развития железнодорожного транспорта ключевую роль в обеспечении безопасности, надежности и эффективности перевозочного процесса играют устройства ЖАТ. Повышение интенсивности движения поездов, увеличение скоростей и усложнение инфраструктуры требуют внедрения передовых технологий, обеспечивающих непрерывный контроль и диагностику состояния устройств ЖАТ. СТДМ представляют

собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для автоматизированного сбора, обработки и анализа информации о состоянии устройств ЖАТ. Эволюция СТДМ прошла путь от простых систем диспетчерского контроля до сложных аппаратно-программных комплексов с элементами искусственного интеллекта, что позволяет значительно повысить эффективность обнаружения и предотвращения отказов [1].

В настоящее время, когда основным типом ЖАТ в России являются релейные системы, внедрение и совершенствование СТДМ приобретает особую актуальность. Они позволяют автоматизировать измерение рабочих параметров устройств управления движением поездов, снижая влияние человеческого фактора и обеспечивая более надежное функционирование систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

Цель работы – анализ эффективности применения СТДМ для устройств ЖАТ. Рассматриваются основные аспекты проектирования систем мониторинга, методы оценки их эффективности, а также перспективы повышения эффективности СТДМ за счет внедрения технологий искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Система технического диагностирования представляет собой комплекс средств, объектов и исполнителей, необходимых для проведения диагностики (контроля) в соответствии с установленными в технической документации правилами [2].

На диаграмме (рис. 1) представлены виды систем технического диагностирования. Систематизация СТДМ может быть выполнена по двум основным признакам: виду диагностирования и степени участия.



Рис. 1. Систематизация СТДМ по ряду классификационных признаков

Диагностирование по методу подразделяется на функциональное и тестовое, различаясь подходом к определению состояния объекта [3]. Функциональное диагностирование использует штатные режимы работы объекта, не требуя его отключения. В этом случае средства диагностики лишь регистрируют параметры, оставаясь пассивными наблюдателями. Тестовое диагностирование, напротив, предполагает активное воздействие на объект специальными сигналами, что требует временного выведения его из эксплуатации. Такие системы активно генерируют тестовые воздействия и анализируют отклик объекта. Существуют также комбинированные системы, объединяющие элементы обоих подходов.

Системы функционального контроля и мониторинга играют ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности устройств железнодорожной

автоматики и телемеханики. Эти системы, эволюционировав от примитивных систем диспетчерского контроля с ограниченным набором параметров, превратились в сложные комплексы, способные к автоматизированному анализу данных и использующие технологии искусственного интеллекта [4]. Техническое усовершенствование позволяет системам функционального контроля и мониторинга более эффективно обнаруживать и предотвращать возможные неисправности, предупреждая от отказов в работе устройств. Производственные процессы становятся более автоматизированными, а алгоритмы анализа диагностической информации – более точными и высокоэффективными.

Одним из ключевых достижений современных систем является внедрение искусственного интеллекта, что значительно расширяет их функциональные возможности. Системы становятся способными к самообучению, что позволяет им адаптироваться к различным условиям эксплуатации и предсказывать возможные проблемы до их возникновения [5].

«Высокий уровень надежности и безопасности современных систем управления движением поездов обеспечивается использованием целого комплекса мер и технических решений. Ключевые аспекты включают в себя конструктивное исполнение элементов, исключающее возможность опасных отказов, применение систем резервирования блоков и узлов, использование самопроверяемых устройств в схемах систем управления, а также проведение регулярного периодического обслуживания устройств в эксплуатации и другие мероприятия» [6].

«В контексте современного железнодорожного транспорта системы функционального контроля и мониторинга, также известные как системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ), играют важную роль. Они предназначены для автоматизированного измерения параметров устройств автоматического управления, а также для сбора, хранения, обработки и выдачи диагностической информации. Эти системы предоставляют операторам и инженерам ценные данные о техническом состоянии контролируемых устройств, а также предупреждают о возможных изменениях и прогнозируемых проблемах в их работе» [7]. Таким образом, СТДМ содействуют обеспечению эффективности и надежности железнодорожных систем.

СТДМ ЖАТ представляют собой совершенные инструменты, способствующие эффективной автоматизации контроля технического состояния устройств, обеспечивая тем самым более безопасное и надежное функционирование железнодорожных систем. Эти системы являются эволюцией от традиционных систем диспетчерского контроля на релейной основе и предоставляют более широкие возможности для мониторинга и предотвращения возможных сбоев и неисправностей.

Современные системы управления движением поездов – ключевой элемент эффективного функционирования железнодорожной инфраструктуры. В Российской Федерации, имеющей одну из самых обширных и сложных сетей железных дорог в мире, внедрение и совершенствование ЖАТ играет важную роль в обеспечении безопасности, пунктуальности и эффективности железнодорожного транспорта. На текущий момент основной тип ЖАТ в стране – релейные системы. Более 95 % систем управления основаны на реле и используют ретрансляторы для передачи сигналов. Такие системы, несмотря на свою надежность, постепенно уступают место современным технологиям, таким как системы цифрового управления движением.

СТДМ ЖАТ включают в себя разнообразное программное обеспечение с операционными системами, адаптированными для работы в железнодорожной среде. Сравнение операционных систем, таких как UNIX, Linux и проприетарных систем, дает представление о преимуществах каждой в обеспечении стабильной работы и эффективного управления системой.

Процесс проектирования системы мониторинга для устройств ЖАТ представляет собой трудоемкий процесс, который в настоящее время практически не содержит элементы автоматизации. Проектирование включает в себя разработку аппаратных

и программных решений. Аппаратные средства разрабатывают оборудование для линейных и центральных постов, а также общей части системы, выполняемой сотрудниками проектных организаций. Программные средства, более сложная часть проекта, проектируются самим производителем системы мониторинга и создают драйверы взаимодействия программных средств с измерительными контроллерами, технологические окна вывода информации и алгоритмы обработки данных. Исходными данными для проектировщика программных средств служат данные, предоставленные разработчиком аппаратных средств.

На рис. 2 показана структура проектирования аппаратных средств мониторинга устройств ЖАТ. В настоящее время процесс проектирования схемных решений систем непрерывного мониторинга в основном выполняется вручную, однако, ведутся работы по автоматизации отдельных процедур. На диаграммах представлено, какие элементы проектируются для систем мониторинга с учетом уровня автоматизации различных стадий проектирования:

- цифра «1» обозначает стадии с высоким уровнем автоматизации (свыше 70 % работ);
- цифра «2» отражает стадии с возможностью автоматизации в небольшой степени (от 20 до 70 %);
- цифра «3» указывает на стадии, которые практически не поддаются автоматизации (менее 20 %).



Рис. 2. Структура проектирования аппаратных средств мониторинга устройств ЖАТ

Как известно, одним из эффективных методов обеспечения высокой устойчивости систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики является применение функционального контроля, внедряемого при помощи средств СТДМ [8]. Преимущества использования СТДМ очевидны: они предоставляют возможность автоматизированного мониторинга технического состояния устройств и предсказания будущих изменений рабочих параметров. Тем не менее остается актуальным вопрос об автоматизации процесса анализа диагностической информации. Задача обеспечения технического диагностирования и мониторинга становится актуальной не только на этапе производства изделий, но также в процессе их последующей эксплуатации. С учетом критической важности обеспечения высокого уровня безопасности при эксплуатации устройств ЖАТ, необходимость проведения мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) становится неотъемлемой [9].

Рассмотрим основные аспекты эффективности таких систем.

1. Повышение надежности и безопасности

Системы технической диагностики и мониторинга предоставляют возможность раннего выявления потенциальных отказов и неисправностей в устройствах ЖАТ. Это способствует оперативному реагированию и предотвращению возможных сбоев. Улучшенная надежность систем ЖАТ приводит к снижению вероятности чрезвычайных ситуаций и повышению общей безопасности железнодорожного движения.

2. Экономическая выгода

Системы мониторинга позволяют сократить расходы на техническое обслуживание и предупреждение отказов. Раннее выявление проблем позволяет проводить запланированные ремонтные работы, минимизируя простои и срочные вмешательства. Экономия ресурсов и средств на оперативное устранение проблем, вызванных отказами, способствует оптимизации бюджета и повышению эффективности использования железнодорожной инфраструктуры.

3. Минимизация воздействия человеческого фактора

Автоматизированный мониторинг и диагностика устройств ЖАТ снижают зависимость от человеческого фактора. Это сокращает риск человеческих ошибок и улучшает точность выявления неисправностей. Минимизация влияния человеческого фактора также повышает оперативность реагирования на изменения в техническом состоянии систем, что особенно важно в условиях железнодорожной эксплуатации.

4. Увеличение производительности и проходимости

Благодаря системам мониторинга можно повысить эффективность использования железнодорожных путей. Предсказуемость состояния устройств

позволяет оптимизировать графики технического обслуживания и предотвращать возможные замедления движения поездов. Эффективное обслуживание и поддержание работоспособности инфраструктуры ЖАТ способствуют увеличению пропускной способности и общей производительности железнодорожных систем.

5. Инновационные технологии и искусственный интеллект

Интеграция инновационных технологий, таких как искусственный интеллект и аналитика данных, позволяет создавать более точные и эффективные системы мониторинга и диагностики. Использование больших данных (Big Data) и алгоритмов машинного обучения дает возможность предсказывать возможные отказы и оптимизировать процессы обслуживания.

Таким образом, эффективность систем технической диагностики и мониторинга в контексте устройств железнодорожной автоматики и телемеханики заключается в повышении надежности, безопасности, экономической выгоде, сокращении человеческого влияния и увеличении общей производительности железнодорожных систем.

Отказы могут не обнаруживаться СТДМ вследствие ее конструктивных особенностей и невозможности контролировать все элементы систем ЖАТ; будем считать, что за рассматриваемый период времени их происходит N_{HH} . Кроме того, СТДМ может выйти из строя, какое-то время находиться в неработоспособном состоянии и поэтому не зафиксировать отказ системы ЖАТ. Таких отказов за период времени ΔT может произойти N_{HY} .

Общее число отказов N в системе ЖАТ за определенный период времени ΔT можно вычислить, используя формулу интенсивности отказов

$$N = \lambda \Delta T,$$

где N – общее число отказов; λ – интенсивность отказов (среднее число отказов за единицу времени); ΔT – период времени.

Эта формула предполагает, что интенсивность отказов постоянна в течение рассматриваемого периода времени. Если интенсивность отказов изменяется, то интегрирование этой функции может потребоваться для более точных вычислений.

Общее количество обнаруживаемых отказов в системе ЖАТ за определенный период времени ΔT может быть вычислено как сумма обнаруживаемых и предотвращаемых отказов, а также обнаруживаемых, но по какой-либо причине не предотвращаемых. Формула учитывает различные типы обнаруживаемых отказов и предоставляет общую картину числа событий за заданный временной интервал

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{об}} + N_{\text{пред}} + N_{\text{непред}},$$

где $N_{\text{общ}}$ – общее количество обнаруживаемых отказов; $N_{\text{об}}$ – количество обнаруживаемых отказов; $N_{\text{пред}}$ – количество предотвращаемых отказов; $N_{\text{непред}}$ – количество обнаруживаемых, но непредотвращаемых отказов.

Потери P от возникновения отказов в системе мониторинга за определенный период времени ΔT могут быть оценены как сумма расходов на восстановление исправного состояния системы (запчасти, материалы, оплата труда) и издержек, связанных с простоем поездов на время восстановления устройств. Формула для вычисления потерь может быть представлена следующим образом:

$$P = C_{\text{в}} + C_{\text{п}},$$

где P – потери от отказов за период времени ΔT ; $C_{\text{в}}$ – расходы на восстановление исправного состояния системы; $C_{\text{п}}$ – издержки, связанные с простоем поездов на время ремонта.

Это уравнение позволяет оценить общие потери от отказов в системе мониторинга и является ключевым показателем для оценки эффективности внедрения мониторинговой системы. Отсюда вытекает, что затраты на внедрение, амортизацию, строительство и эксплуатацию СТДМ должны быть ниже суммы сэкономленных средств в течение расчетного периода. В этом случае, как упоминалось ранее, внедрение СТДМ является экономически обоснованным.

В процессе функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) неминуемо возникают неполадки, проявляющиеся в форме отказов. Классификация отказов, основанная на их природе, традиционно включает постепенные, внезапные и прерывистые типы. Внезапные отказы носят характер случайных событий, и их предотвращение практически невозможно из-за непредсказуемости возникновения, вызванного резкими изменениями в параметрах оборудования. Однако использование систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ) позволяет оперативно регистрировать время и место возникновения неисправности, сохраняя информацию для последующего анализа.

Постепенные отказы развиваются вследствие плавных изменений характеристик оборудования, что дает возможность прогнозировать их наступление. Таким образом, предотвращение таких отказов возможно при условии использования датчиков, обеспечивающих непрерывный сбор диагностиче-

ских данных, и системы оповещения для своевременного реагирования персонала.

Следовательно, для достижения наивысшей обнаруживающей способности СТДМ необходимо минимизировать время диагностики и сократить количество невыявленных состояний, предшествующих отказу в устройствах сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Положительный эффект от внедрения СТДМ определяется не только сокращением штата обслуживающего персонала и исключением влияния человеческого фактора, но и другими экономическими аспектами. Ключевым показателем является доля обнаруженных и предотвращенных отказов от общего их числа. Чем ближе коэффициент эффективности ξ к единице, тем выше эффективность СТДМ.

Выводы

СТДМ играют ключевую роль в автоматизации процессов контроля состояния оборудования, что позволяет значительно снизить вероятность отказов и повысить оперативность реагирования на возникающие неисправности. Эффективность СТДМ ограничена неполным охватом контролируемых элементов, риском выхода самой системы из строя, а также наличием непредотвращаемых отказов (например, внезапных). Критическим показателем остается коэффициент ξ , характеризующий долю предотвращаемых отказов: его приближение к единице – ключевая задача для повышения эффективности. Результаты исследования показывают, что для максимизации обнаруживающей способности СТДМ рекомендуется стремиться к увеличению времени диагностирования и сокращению числа невыявляемых предотказных состояний устройств ЖАТ. Важно продолжать разработку оптимальных стратегий технического обслуживания на основе данных, полученных от системы мониторинга. Это, в свою очередь, ведет к снижению затрат на обслуживание и ремонты, а также к увеличению общей надежности железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, дальнейшее развитие и совершенствование систем технической диагностики и мониторинга является необходимым условием для повышения безопасности и эффективности работы железнодорожного транспорта. Внедрение инновационных технологий и методов анализа данных откроет новые горизонты для оптимизации процессов эксплуатации и обслуживания устройств ЖАТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Надежкин В.А., Хохрин А.С. Анализ возможности применения предиктивной аналитики с использованием data science и Big data на железнодорожном транспорте // Образование – наука – производство : материалы V Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Чита, 07 октября 2021 г. Т. 1. Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского университета путей сообщения, 2021. С. 123–127. EDN: ZAHOGM.
2. Тарасов Е.М., Тарасова А.Е., Надежкин В.А. К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга // Наука и образование транспорту. 2022. № 1. С. 362–364. EDN: ZLIYYT.

3. Васин Н.Н., Тарасова А.Е., Надежкина С.А. Целесообразность перехода от использования медных кабелей к внедрению волоконно-оптических линий связи для обеспечения повышения надежности каналов передачи информации с АСДК // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 209–211. EDN: DMDOXP.
4. Разработка математической модели изолирующих стыков в комплексе с дроссель-трансформаторами / Е.М. Тарасов, С.А. Вельмин, В.А. Надежкин, А.Е. Тарасова // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 316–320. EDN: DPZVHC.
5. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability / J. Endrenyi, S. Aboresheid, R.N. Allan [et al.] // IEEE Transactions on power systems. 2001. Vol. 16, № 4. P. 638–646.
6. Горелова Д.А., Горелова М.А. Разбор внедрения SCADA-систем в промышленности на примере внедрения SCADA trace mode 6 // Студенческий вестник. 2020. № 40-5(138). С. 77–82.
7. Efanov D.V., Osadchy G. V., Khoroshev V.V. Digital Train Traffic Control System with Perfect Level of Diagnostics and Monitoring: Virtual and Radio Interlocking // Proceedings–2021 : International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Sochi, 05–11 сентября 2021 г. Sochi : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. Pp. 214–220. EDN: GIWJGZ. doi:10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537526
8. Нестеров В.В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 12. С. 45–46. EDN: PJPAAZ.
9. Ефанов Д.В., Хорошев В.В. Новый подход к диагностированию устройств ЖАТ / Д.В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 3. С. 22–26. EDN UHCOZQ. doi:10.34649/AT.2022.3.3.003

REFERENCES

1. Nadezhkin V.A., Khokhrin A.S. Analiz vozmozhnosti primeneniya predikativnoj analitiki s ispol'zovaniyem data science i Big data na zhelezнодорожном транспорте [Analysis of the possibility of applying predictive analytics using data science and Big data in railway transport // Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo : materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem), Chita, 07 oktyabrya 2021 g. T. 1. Chita : Zabaikal'skiy institut zhelezнодорожного транспорта – filial Irkutskogo universiteta putej soobshcheniya, 2021. S. 123–127. EDN: ZAHOGM.
2. Tarasov E.M., Tarasova A.E., Nadezhkin V.A. K voprosu avtomatizatsii tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa [On the issue of automation of technical diagnostics and monitoring] // Nauka i obrazovanie transportu. 2022. № 1. S. 362–364. EDN: ZLIYYT.
3. Vasin N.N., Tarasova A.E., Nadezhkina S.A. Tselesoobraznost' perekhoda ot mednykh kabelej k vnedreniyu volokonno-opticheskikh linij svyazi dlya obespecheniya povysheniya nadezhnosti kanalov peredachi informatsii s ASDK [Expedience of the transition from the use of copper cables to the introduction of fiber-optic communication lines to ensure increased reliability of information transmission channels with ASDC] // Nauka i obrazovanie transportu. 2023. № 1. P. 209–211. EDN: DMDOXP.
4. Razrabotka matematicheskoy modeli izoliruyushchikh stykov v komplekse s drossel'-transformatorami [Development of a mathematical model of insulating joints in combination with choke-transformers / E.M. Tarasov, S.A. Velmin, V.A. Nadezhkin, A.E. Tarasova // Nauka i obrazovanie transportu. 2021. № 1. P. 316–320. EDN: DPZVHC.
5. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability / J. Endrenyi, S. Aboresheid, R.N. Allan [et al.] // IEEE Transactions on power systems. 2001. Vol. 16, № 4. P. 638–646.
6. Gorelova D.A., Gorelova M.A. Razbor vnedreniya SCADA-sistem v promyshlennosti na primere vnedreniya SCADA trace mode 6 [Analysis of the implementation of SCADA systems in industry using the example of implementing SCADA trace mode 6] // Studencheskiy vestnik. 2020. № 40-5(138). P. 77–82.
7. Efanov D.V., Osadchy G. V., Khoroshev V.V. Digital Train Traffic Control System with Perfect Level of Diagnostics and Monitoring: Virtual and Radio Interlocking // Proceedings–2021 : International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Sochi, 05–11 sentyabrya 2021 g. Sochi : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. Pp. 214–220. EDN: GIWJGZ. doi:10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537526
8. Nesterov V.V. Razvitiye sistem STDM, ASU-SH-2 i AOS-SHCH [Development of the STDM, ASU-SH-2 and AOS-SHCH systems] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2012. № 12. S. 45–46. EDN: PJPAAZ.
9. Efanov D.V., Khoroshev V.V. Novyy podkhod k diagnostirovaniyu ustrojstv ZhAT [A new approach to the diagnosis of railway automation and telemchanics devices] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2022. № 3. S. 22–26. EDN: UHCOZQ. doi:10.34649/AT.2022.3.3.003

Информация об авторах

Е.М. Тарасов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;
В.А. Надежкин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;
С.А. Надежкина – преподаватель, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

Information about the authors

E.M. Tarasov – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Automation, Telemchanics and Communication in Railway Transport;
V.A. Nadezhkin – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Automation, Telemchanics and Communication in Railway Transport;
S.A. Nadezhkina – Lecturer, Postgraduate Student, Department of Automation, Telemchanics and Communication in Railway Transport.

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 19.03.2025; принята к публикации 19.03.2025.
The article was submitted: 27.02.2025; approved after reviewing: 19.03.2025; accepted for publication: 19.03.2025.

Научная статья
УДК 625.113
doi:10.31079/2415-8658-2025-1-108-118

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ КАДИОИД В ГЕОМЕТРИИ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Чонка Артем Викторович¹, Парахненко Инна Леонидовна²

^{1,2} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

¹ RayL-er@outlook.com

² IParahnenko@usurt.ru

Аннотация. Повышение скоростей движения на железных дорогах требует ужесточения требований, предъявляемых к геометрии железнодорожного пути. Клотоидная геометрия переходных кривых, используемая на данный момент на железных дорогах, не является оптимальной с точки зрения динамики подвижного состава ввиду отсутствия неразрывности в изменении непогашенного ускорения и, как следствие, усилий, действующих на состав в кривой. Кадииодная геометрия, разработанная с позиции обеспечения гладкости функции кривизны и неразрывности ее производной, может быть более оптимальным выбором.

Рассматриваются геометрические характеристики клотоидной и кадииодной геометрий, а также их влияние на динамику состава, движущегося в кривой. По данным имитационного моделирования динамики состава в кривых произведено сравнение воздействующих усилий и характера их изменения. Произведено разложение Фурье для определения частотного состава колебаний усилий, воздействующих на состав. Сформированы выводы о преимуществах и основных трудностях устройства кадииодной кривой с криволинейным отводом возвышения, обозначены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: клотоида, кадииода, переходная кривая, плавность движения, криволинейный отвод возвышения, непогашенное ускорение

Original article

ON THE USE OF CADIOIDS IN THE GEOMETRY OF A RAILWAY TRACK

Chonka Artem V.¹, Parakhnenko Inna L.²

^{1,2} Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

¹ RayL-er@outlook.com

² IParahnenko@usurt.ru

Abstract. The higher the train's speed, the stricter the requirements imposed on track's geometry should be. Clothoid geometry of transition curves, at present time widely used on Russian railways is not optimum from the standpoint of the dynamics of rolling stock due to discontinuity in the change of uncompensated acceleration and as a consequence, of forces affecting a train in a curve. Cadioidal geometry worked out from the position of securing smooth curvature function and continuance of its derivative can be a better choice.

In this article geometrical natures of clothoid and cadioid curves are considered and compared along with their influence on the dynamics of the train moving through them. Results of high speed train dynamics calculations are used to compare forces acting on the train and the track. A Fourier transform of the result data has been performed in order to study a frequency composition of oscillations of forces acting on a train. The conclusions are drawn on benefits of cadioid geometry use as well as some concerns about the necessity of nonlinear cant ramp construction, directions of further research are identified.

Keywords: clothoid, cadioid, transition curve, ride smoothness, nonlinear cant ramp, uncompensated lateral acceleration

Железнодорожный транспорт играет одну из ключевых ролей в экономике и обороноспособности государства. Техническое развитие страны неизменно требует повышения пропускной способности железнодорожной сети, в связи с чем растет необходимость развития высокоскоростного транспорта. Однако повышение скоростей движения без соответствующих технических решений в области геометрии трассы ставит безопасность перевозок под угрозу.

Высокие скорости движения неотъемлемо влекут за собой необходимость повышения плавности трассы. Важность обеспечения плавности геометрии пути и непрерывности изменения центростремительного ускорения на автомобильных дорогах освещалась в работах Г.В. Величко [1, 2], А.А. Белятынского, А.М. Таранова [3] и В.Н. Чешуйко [4], однако, в данных трудах также отмечено, что клотоида, являющаяся самой распространенной переходной кривой на железных дорогах, не отвечает предъявляемым требованиям.

В связи с достаточно жесткой связью между геометрией трассы и динамикой железнодорожного экипажа, разумно предположить, что клотоида не является оптимальной для железных дорог, потому необходимо альтернативное решение. В данной статье рассмотрены перспективы применения в качестве переходной кривой на железных дорогах кадиоиды типа I, разработанной А.А. Белятыным и А.М. Тарановым [3] с целью обеспечения непрерывного плавного изменения кривизны дороги.

Для проведения первичного сравнительного анализа принято четыре радиуса кривых – 5500, 6000, 7000 и 10 000 м, по которым подобраны по 4 вида геометрии кривых участков с поворотом на 20°: клотоидная, кадиоидная и их варианты с удлиненными переходными кривыми. Характеристики кривых соответствуют требованиям специальных технических условий проектирования высокоскоростной магистрали [5] с учетом скорости движения в 300 км/ч. В работе приведено сравнение кривых на основе принятых математических моделей.

Кадиоиды типа I описывается системой параметрических уравнений [3]:

$$\begin{cases} x(\tau) = R\alpha \int_0^\tau \cos\left(\alpha\left(\tau^3 - \frac{\tau^4}{2}\right)\right) d\tau; \\ y(\tau) = R\alpha \int_0^\tau \sin\left(\alpha\left(\tau^3 - \frac{\tau^4}{2}\right)\right) d\tau, 0 \leq S \leq L, \end{cases} \quad (1.1)$$

где R – радиус круговой кривой, м; α – угол поворота трассы, рад, $\alpha = L/R$; L – длина переходной кривой, м; S – длина пути от начала кривой до рассматриваемой точки, м, $\tau = S/L$.

Для сравнения взята клотоида в прямоугольной системе координат, описываемая интегралами Эйлера:

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{1}{\alpha} \int_0^s \cos(s^2) ds; \\ y(\tau) = \frac{1}{\alpha} \int_0^s \sin(s^2) ds; \\ a = \frac{1}{\sqrt{2 R_{\text{КК}} L_{\text{нк}}}}; \\ s = L_{\text{нк}} a \tau. \end{cases} \quad (1.2)$$

Из графиков (рис. 1, 2) видно, что кадиоиды имеет нелинейную функцию кривизны, изменение которой явно замедляется в начале и конце кривой.

Согласуясь с предыдущими работами в данном направлении, формулы непогашенного ускорения, непогашенного рывка, возвышения наружного рельса и скорости подъема колеса соответственно [6, 7]:

$$a_{\text{нп}} = \frac{v^2}{3,6^2 R(\tau)} - g \frac{h(\tau)}{S_{\text{к}}}, \quad (1.3)$$

где v – скорость движения, 300 км/ч; g – ускорение свободного падения, 9,807 м/с²; h – возвышение наружного рельса в круговой кривой, мм; $S_{\text{к}}$ – расстояние между осями рельсов, 1600 мм;

$$j_{\text{нп}}(\tau) = \frac{v}{L_{\text{пк}}} \frac{da_{\text{нп}}}{d\tau}; \quad (1.4)$$

$$h(\tau) \propto a_{\text{цб}}(\tau) \propto K(\tau) \Rightarrow h(\tau) = h_{\text{КК}} \frac{K(\tau)}{K_{\text{КК}}}, \quad (1.5)$$

где $h_{\text{КК}}$ – возвышение наружного рельса в КК;

$K_{\text{КК}} = \frac{1}{R_{\text{КК}}}$ – кривизна КК;

$$h'(\tau) = \frac{v}{L_{\text{пк}}} \frac{dh(\tau)}{d\tau}. \quad (1.6)$$

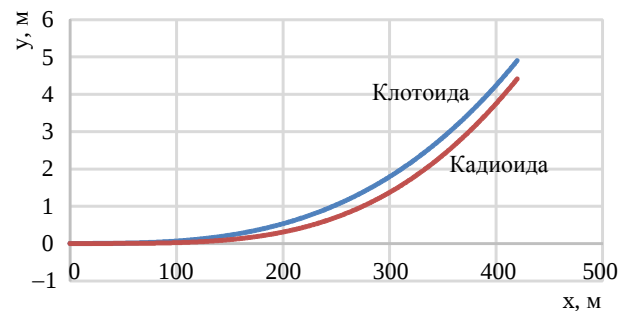


Рис. 1. Сравнение очертаний клотоиды и кадиоиды при одинаковых параметрах

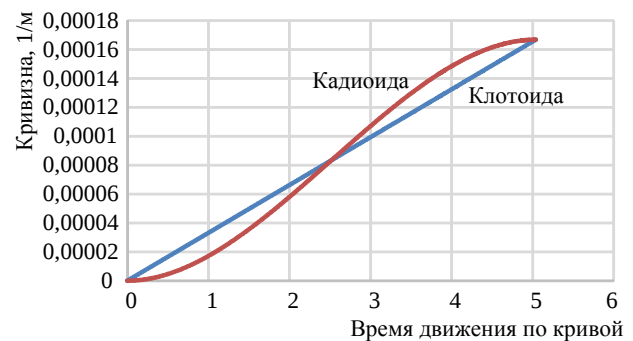


Рис. 2. График изменения кривизны в точке, скользящей по кривой с постоянной скоростью, в зависимости от времени

При построении графиков характеристик кривых очевидна проблема, связанная с геометрическими особенностями кадиоид: подобранная кривая превышает ограничение по скорости подъема колеса (28 мм/с), что отчетливо видно на рис. 3–6. С целью сравнительного анализа и для обеспечения ограничения по скорости подъема колеса, также произведены расчеты с удлиненными переходными кривыми.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ КАДИОИД В ГЕОМЕТРИИ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

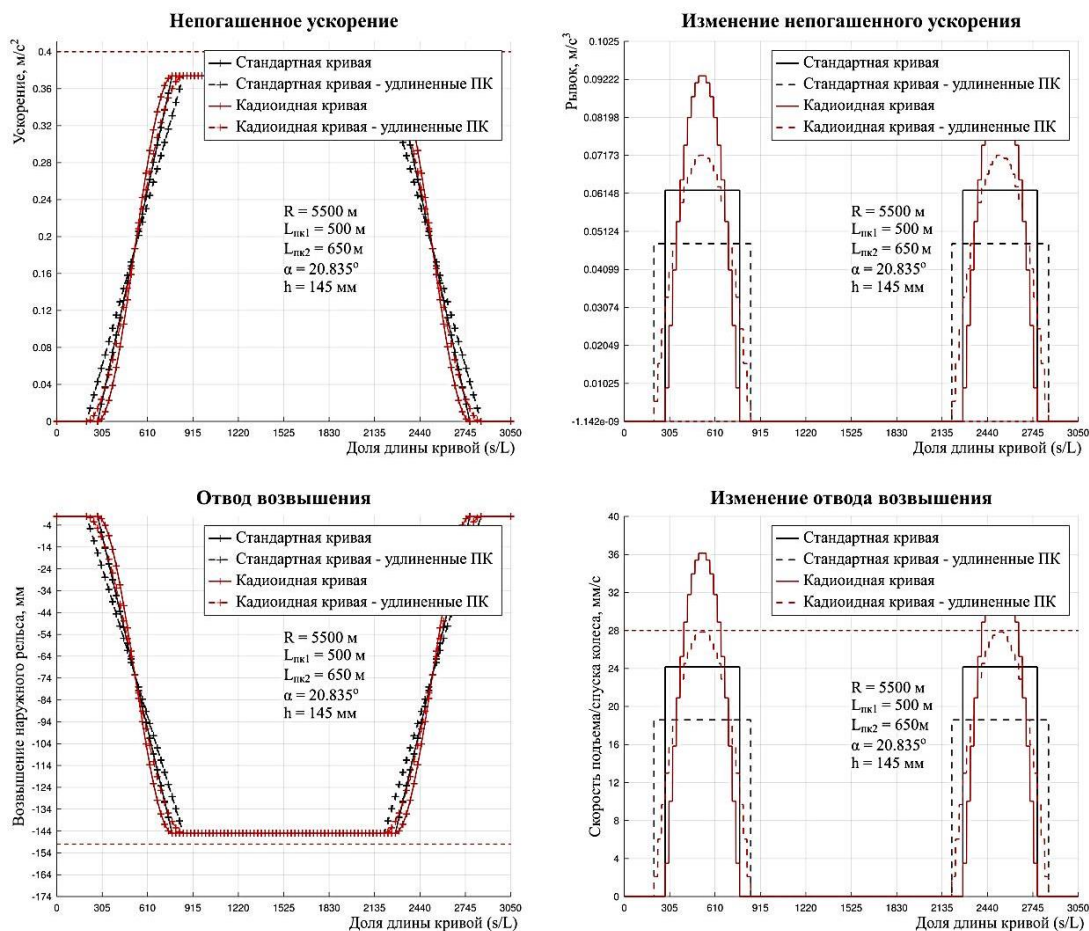


Рис. 3. Сравнительные графики характеристик кривых для R5500

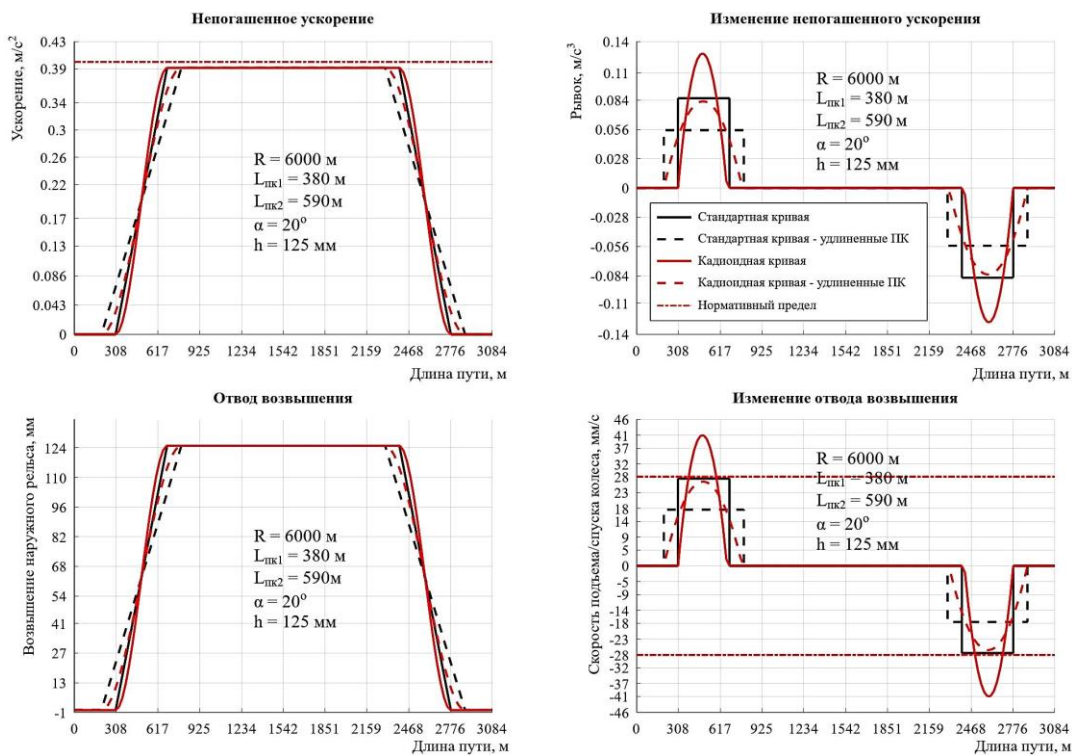


Рис. 4. Сравнительные графики характеристик кривых для R6000

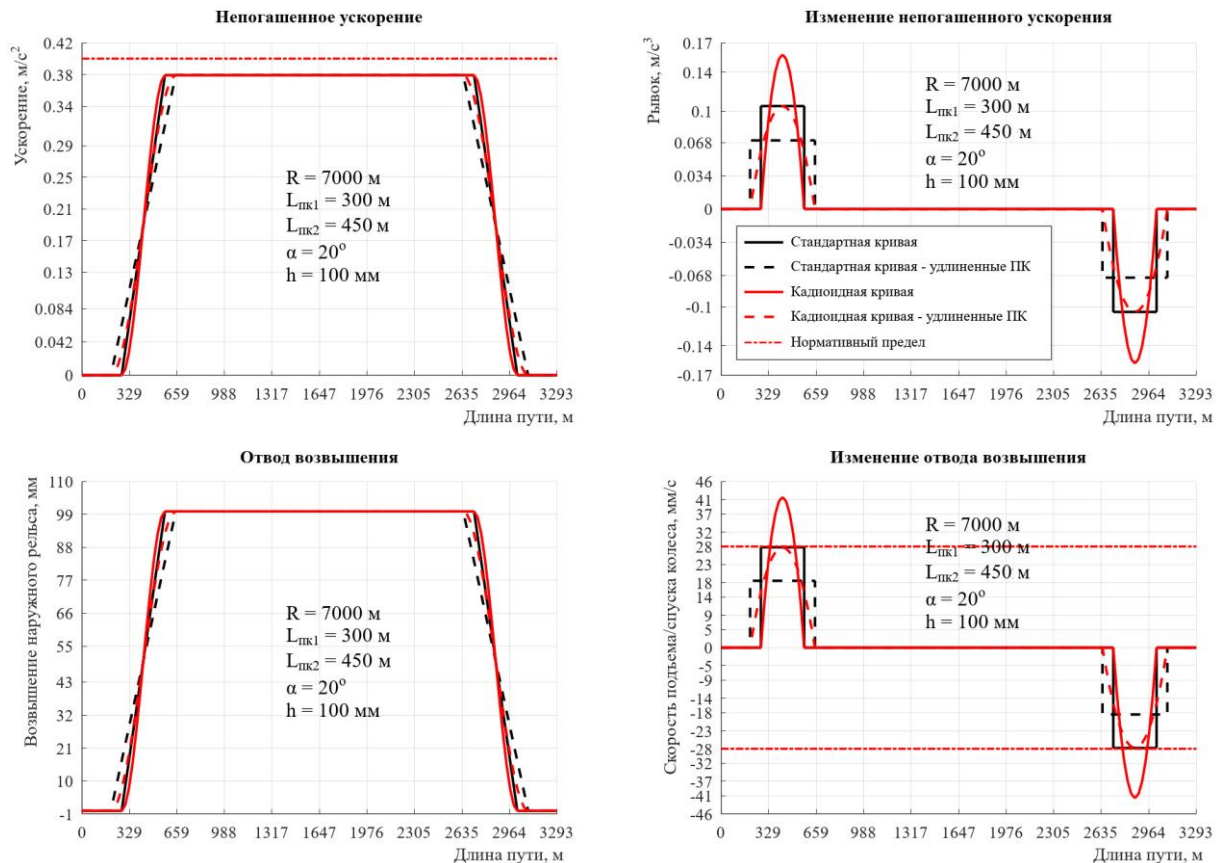


Рис. 5. Сравнительные графики характеристик кривых для R7000

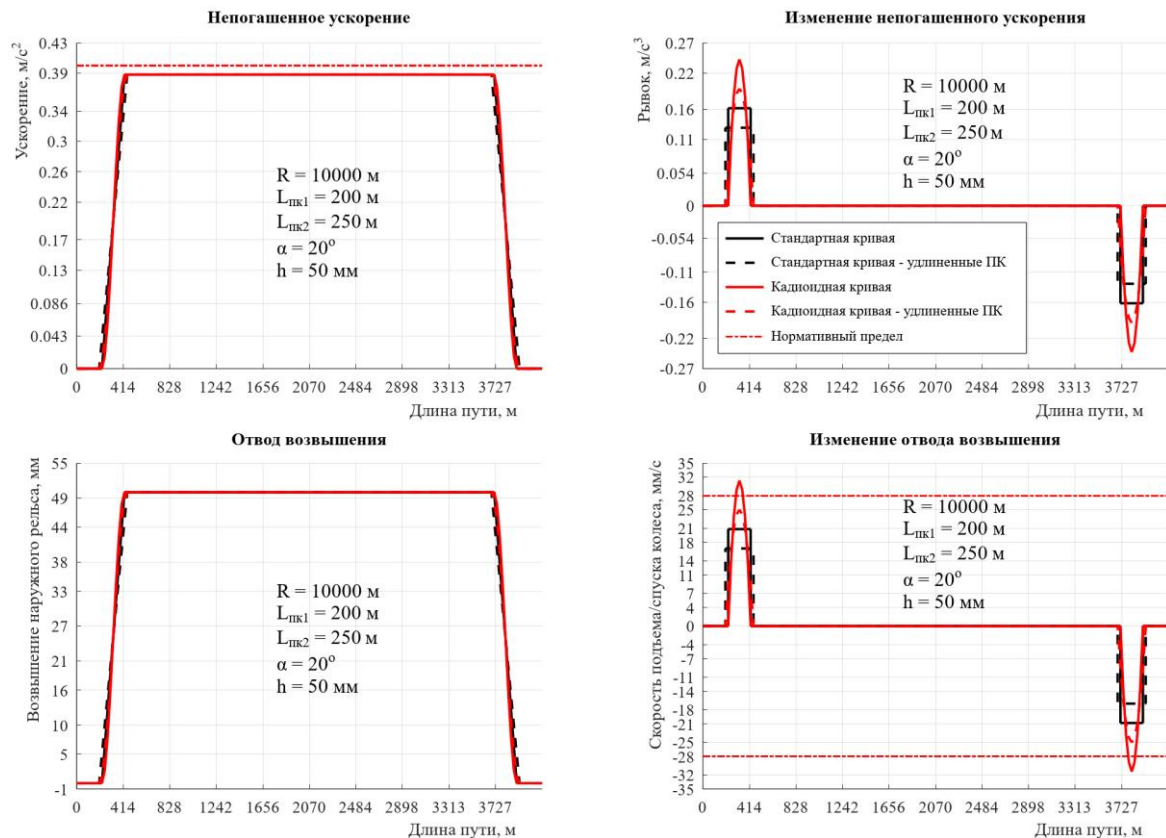


Рис. 6. Сравнительные графики характеристик кривых для R10 000

Следует отметить, что отрицательное значение возвышения на графиках означает возвышения правой рельсовой нити.

Посредством имитационного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» [8] по рассматриваемым кривым был выполнен расчет динамики высокоскоростного электропоезда.

Результаты расчетов по определению непогашенного ускорения приведены на рис. 7–10. Интегральная оценка остальных усилий представлена в табл. 1.

При рассмотрении результатов моделирования (рис. 7–10) следует отметить достаточное соответствие усредненных значений ускорения, полученных изоляцией низких частот с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT), вычисленным по идеализированной математической модели кривой; рассчитанное неразрывное плавное изменение усилий также подтверждается. Отдельно стоит выделить достаточно низкую амплитуду ко-

лебаний усилий, воздействующих на поезд при прохождении первой переходной кривой. Данный результат подтверждается исследованиями взаимодействия поезда с S-образным отводом возвышения наружного рельса в переходной кривой [9].

Моделирование динамики поезда проводилось с достаточно малым шагом интегрирования, что позволяет произвести частотный анализ полученных результатов. На графиках спектров откликов (рис. 7–10) отчетливо видно преобладание низких частот (до 10 Гц) вне зависимости от геометрии; также отмечены частоты и амплитуды откликов, выбранные для построения усредненных графиков результатов.

Несмотря на схожесть графиков частотных откликов, очевидна разница в характерах нарастания амплитуд колебаний. Для оценки общего силового воздействия на состав подсчитаны интегральные значения различных усилий (импульсы сил). Сводная оценка приведена в табл. 1.

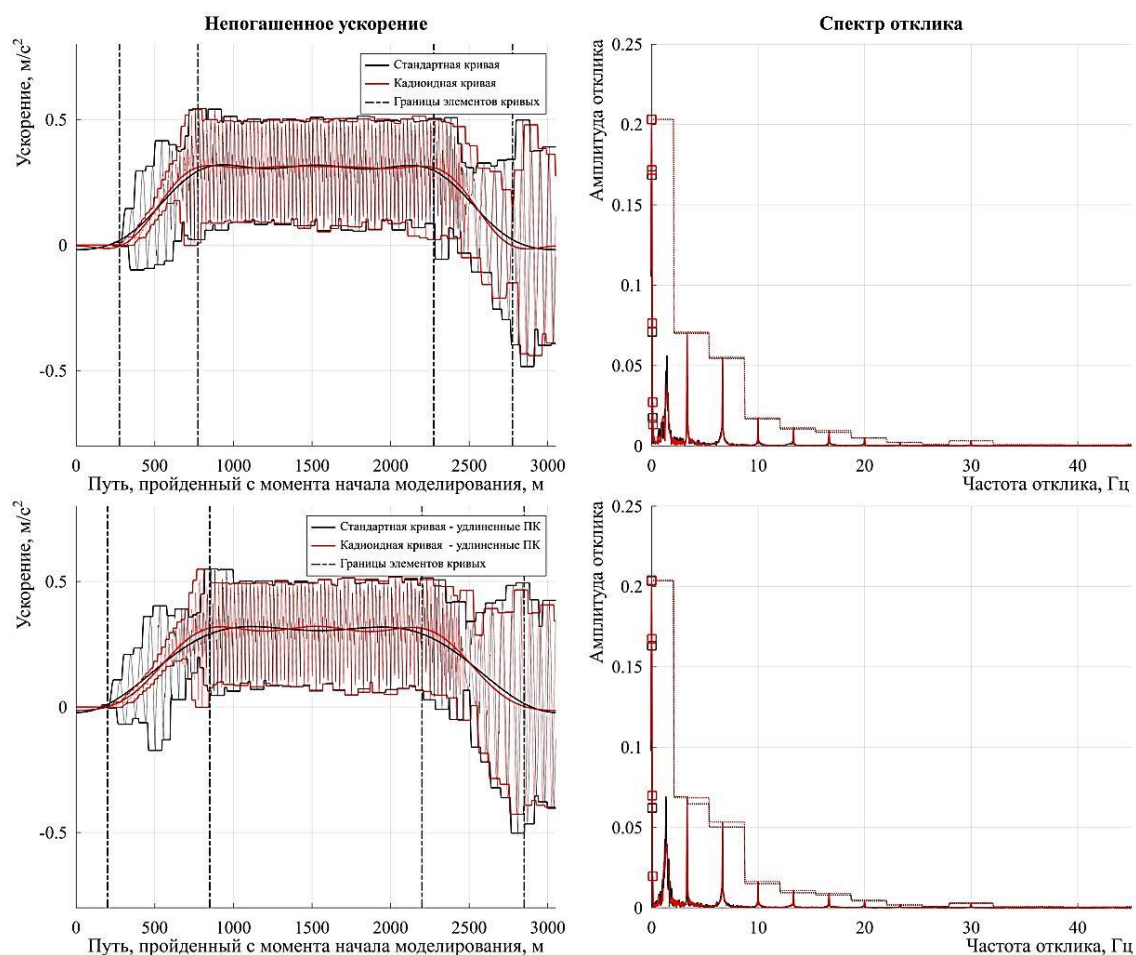


Рис. 7. Результаты расчета непогашенного ускорения для R5500

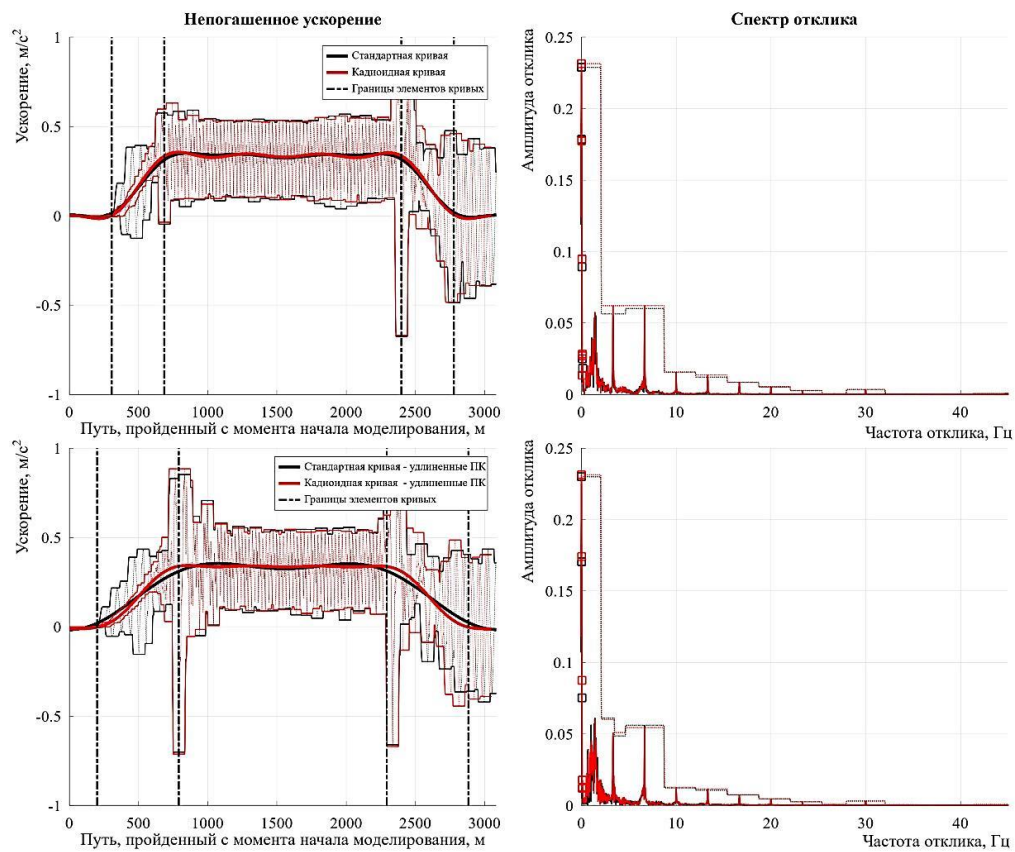


Рис. 8. Результаты расчета непогашенного ускорения для R6000

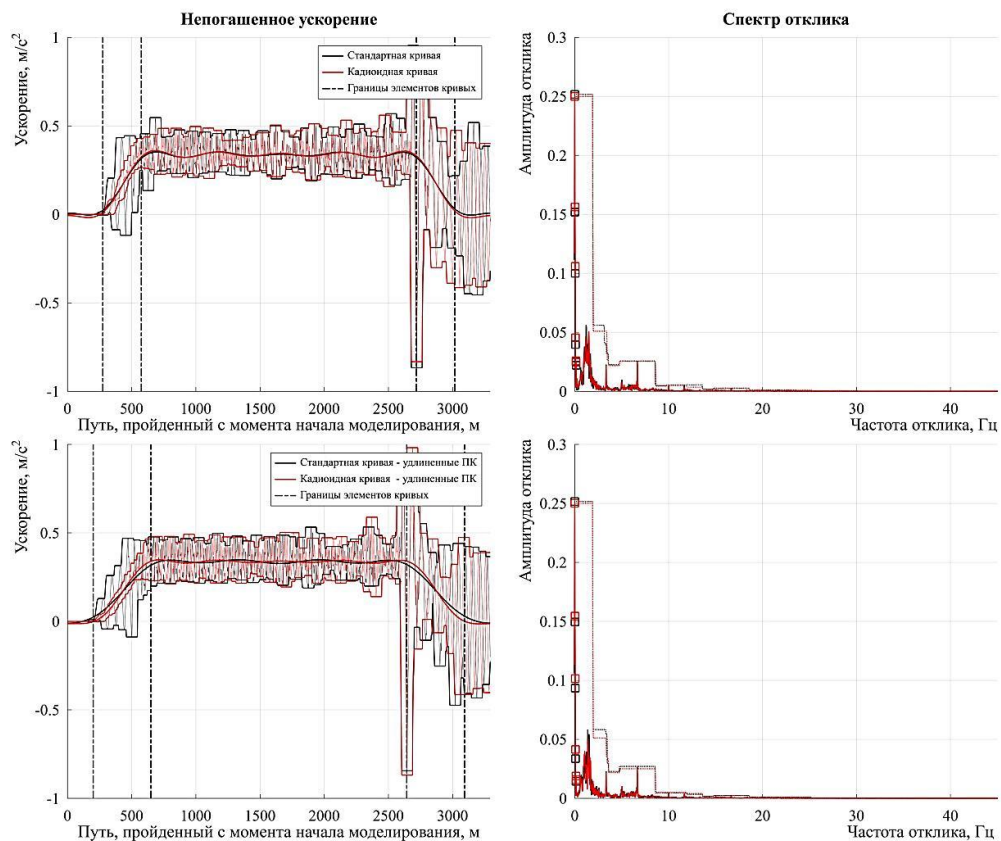


Рис. 9. Результаты расчета непогашенного ускорения для R7000

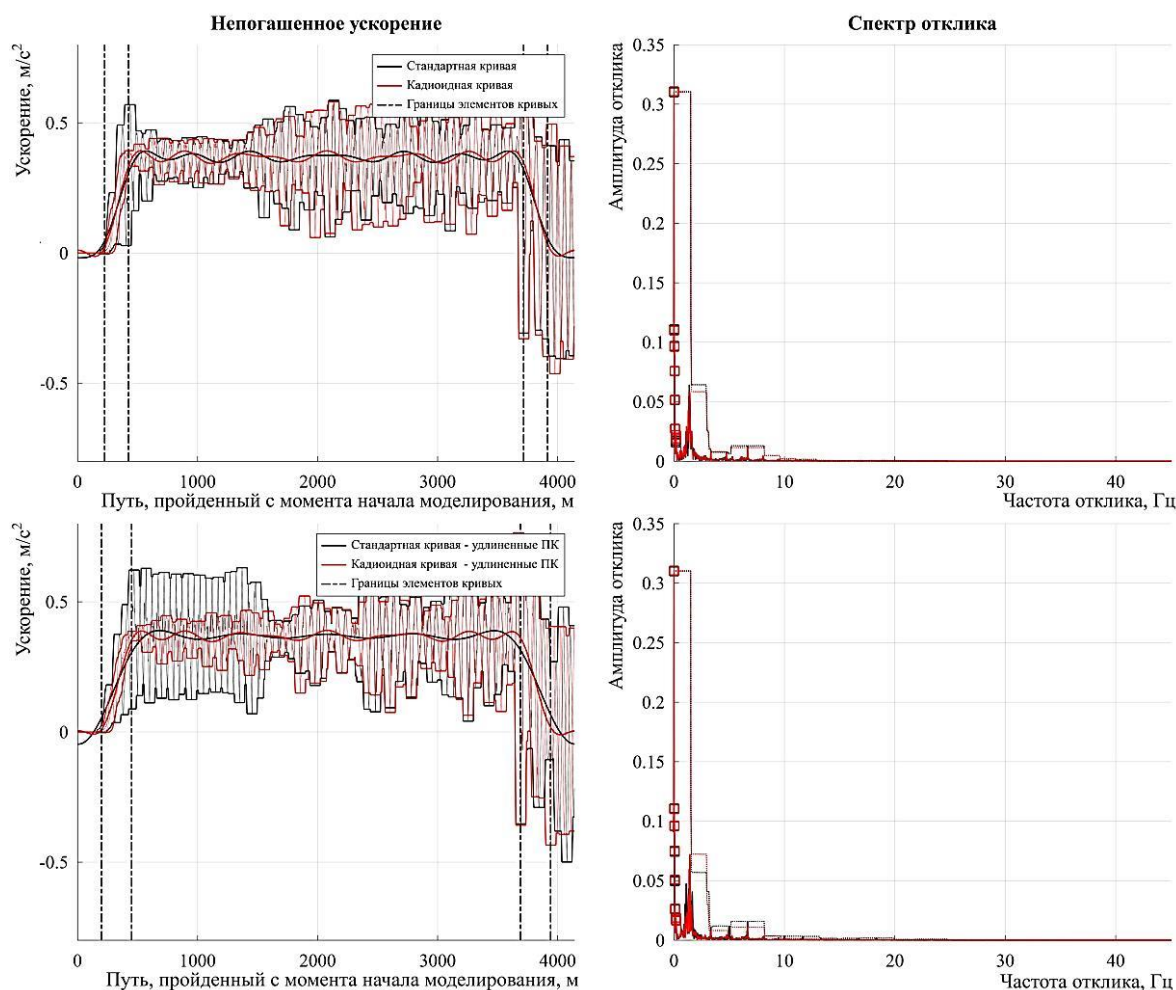


Рис. 10. Результаты расчета непогашенного ускорения для R10 000

Результаты в табл. 1 говорят о незначительной разнице между вариантами геометрии. Однако на графиках видна существенная разница на определенном участке – входной переходной кривой. Ограничение вычисления интегралов до данного участка позволяет получить результаты, которые указывают на преимущество кадионидной переходной кривой (табл. 2). Вероятно, практическое отсутствие существенной разницы на общих результатах связано с тем, что варианты геометрии имеют участок круговой кривой существенной длины, а ее ликвидация с формированием биклотоиды или бикадиониды имеют перспективы снижения общей картины нагрузок.

Завершая сравнительный анализ, отметим основные выводы и потенциальные направления изучения.

1. Кадионидные переходные кривые могут обладать необходимыми для ВСМ свойствами, но требуют решений по устройству оптимального очертания отвода возвышения наружного рельса.

2. Оптимальным решением для железных дорог могут оказаться бикадионидные кривые, рассмотренные А.А. Белятыным [3, 4], так как большая длина переходных кривых упростит устройство отвода возвышения, а ликвидация круговой кривой имеет преимущества, описанные в исследованиях в области использования биклотоидных кривых [10–12].

3. Возникновение низкочастотных колебаний усилий в кривых требует подтверждения и дальнейшего исследования причин и методов предотвращения, так как исследования указывают связь между колебаниями частотой в 1 Гц и возникновением у пассажиров симптомов морской болезни [13, 14].

Таблица 1

Интегральные значения усилий при движении в различных кривых

	Интегралы по времени								Снижение значения интеграла, %							
	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК), Н·с	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)	Продольной силы крива (ЛК)
R5500 L3050																
Стандартная	1.22E+05	1.48E+05	1.62E+05	1.58E+05	1.52E+05	1.55E+05	2.31E+05	3.36E+05	2.93E+06	3.21E+06	8.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная	1.17E+05	1.44E+05	1.64E+05	1.59E+05	1.46E+05	1.50E+05	2.30E+05	3.36E+05	2.93E+06	3.21E+06	8.38	4.61	2.61	-0.92	-0.98	3.81
Стандартная – удл.ПК	1.25E+05	1.44E+05	1.56E+05	1.54E+05	1.52E+05	1.55E+05	2.19E+05	3.23E+05	2.93E+06	3.20E+06	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная – удл.ПК	1.21E+05	1.46E+05	1.60E+05	1.57E+05	1.50E+05	1.53E+05	2.25E+05	3.30E+05	2.93E+06	3.21E+06	8.56	2.95	-1.03	-2.43	-1.65	1.40
R6000 L3084																
Стандартная	1.19E+05	1.46E+05	1.68E+05	1.57E+05	1.52E+05	1.54E+05	2.29E+05	3.50E+05	2.95E+06	3.25E+06	9.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная	1.17E+05	1.45E+05	1.68E+05	1.57E+05	1.50E+05	1.52E+05	2.30E+05	3.51E+05	2.91E+06	3.22E+06	9.68	1.69	0.68	-0.06	-0.34	1.09
Стандартная – удл.ПК	1.23E+05	1.46E+05	1.63E+05	1.53E+05	1.53E+05	1.55E+05	2.19E+05	3.36E+05	2.95E+06	3.25E+06	9.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная – удл.ПК	1.19E+05	1.44E+05	1.64E+05	1.54E+05	1.50E+05	1.52E+05	2.22E+05	3.40E+05	2.91E+06	3.22E+06	9.72	3.65	1.15	-1.16	-0.85	2.27
R7000 L3293																
Стандартная	1.38E+05	1.12E+05	1.21E+05	1.09E+05	1.44E+05	1.44E+05	9.91E+04	2.15E+05	3.14E+06	3.48E+06	11.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная	1.41E+05	1.14E+05	1.21E+05	1.11E+05	1.48E+05	1.47E+05	1.02E+05	2.18E+05	3.14E+06	3.48E+06	11.20	-2.19	-2.09	0.35	-2.18	-2.40
Стандартная – удл.ПК	1.42E+05	1.16E+05	1.21E+05	1.11E+05	1.50E+05	1.49E+05	1.05E+05	2.19E+05	3.14E+06	3.47E+06	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная – удл.ПК	1.38E+05	1.14E+05	1.21E+05	1.10E+05	1.46E+05	1.45E+05	1.01E+05	2.13E+05	3.14E+06	3.47E+06	10.98	2.60	1.62	0.13	0.92	2.80
R10000 L4141																
Стандартная	1.51E+05	1.34E+05	1.67E+05	6.30E+04	1.53E+05	1.53E+05	5.60E+04	2.41E+05	3.89E+06	4.41E+06	16.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная	1.52E+05	1.36E+05	1.69E+05	6.30E+04	1.54E+05	1.54E+05	5.60E+04	2.40E+05	3.89E+06	4.41E+06	16.28	-0.78	-1.76	-1.02	0.14	-0.95
Стандартная – удл.ПК	1.61E+05	1.41E+05	1.70E+05	8.20E+04	1.67E+05	1.67E+05	7.91E+04	2.66E+05	3.89E+06	4.41E+06	16.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадионидная – удл.ПК	1.50E+05	1.37E+05	1.70E+05	5.97E+04	1.53E+05	1.53E+05	5.39E+04	2.35E+05	3.89E+06	4.40E+06	16.25	6.63	2.64	-0.23	27.21	8.29

Таблица 2

Интегральные значения усилий при движении в различных переходных кривых

	Интегралы по времени										Снижение значения интеграла, %					
	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с	Продольной силы кривая (ЛК), Н·с
R5500 L3050																
Стандартная	2.20E+04	2.20E+04	3.46E+04	3.54E+04	2.50E+04	2.51E+04	3.11E+04	4.34E+04	8.23E+05	8.82E+05	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная	1.94E+04	2.03E+04	3.45E+04	3.57E+04	2.20E+04	2.22E+04	2.87E+04	4.04E+04	8.23E+05	8.82E+05	1.20	11.88	7.87	0.26	-0.69	12.11
Стандартная – удл.ПК	2.41E+04	2.03E+04	2.94E+04	3.19E+04	2.49E+04	2.48E+04	2.05E+04	3.13E+04	8.23E+05	8.82E+05	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная – удл.ПК	2.09E+04	2.03E+04	3.17E+04	3.37E+04	2.27E+04	2.27E+04	2.43E+04	3.42E+04	8.24E+05	8.81E+05	1.20	13.02	0.12	-7.84	-5.62	8.82
R6000 L3084																
Стандартная	1.81E+04	1.81E+04	3.23E+04	3.15E+04	2.02E+04	2.04E+04	2.40E+04	3.89E+04	7.63E+05	8.21E+05	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная	1.67E+04	1.71E+04	3.28E+04	3.23E+04	1.89E+04	1.91E+04	2.39E+04	3.80E+04	7.63E+05	8.21E+05	1.18	7.70	5.51	-1.30	-2.54	6.48
Стандартная – удл.ПК	2.09E+04	1.94E+04	2.92E+04	2.84E+04	2.23E+04	2.23E+04	1.97E+04	3.06E+04	7.64E+05	8.20E+05	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная – удл.ПК	1.82E+04	1.85E+04	3.03E+04	2.94E+04	2.00E+04	2.01E+04	2.04E+04	3.02E+04	7.65E+05	8.19E+05	1.27	12.96	4.64	-3.51	-3.39	10.34
R7000 L3293																
Стандартная	1.39E+04	1.18E+04	2.40E+04	2.25E+04	1.42E+04	1.41E+04	1.13E+04	2.13E+04	6.30E+05	6.72E+05	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная	1.26E+04	1.07E+04	2.34E+04	2.23E+04	1.26E+04	1.26E+04	9.52E+03	1.85E+04	6.30E+05	6.72E+05	0.89	9.36	9.65	2.68	0.95	11.06
Стандартная – удл.ПК	1.54E+04	1.38E+04	2.40E+04	2.24E+04	1.61E+04	1.60E+04	1.30E+04	2.19E+04	6.30E+05	6.73E+05	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная – удл.ПК	1.32E+04	1.20E+04	2.34E+04	2.14E+04	1.33E+04	1.34E+04	9.56E+03	1.74E+04	6.30E+05	6.72E+05	0.90	14.10	12.57	2.28	4.68	16.89
R10000 L4141																
Стандартная	6.06E+03	5.56E+03	1.75E+04	1.38E+04	6.06E+03	6.06E+03	4.94E+03	1.12E+04	4.39E+05	4.62E+05	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная	5.78E+03	5.74E+03	1.77E+04	1.35E+04	5.78E+03	5.81E+03	4.27E+03	9.91E+03	4.39E+05	4.62E+05	0.53	4.57	-3.25	-0.86	2.78	4.57
Стандартная – удл.ПК	6.59E+03	6.40E+03	1.73E+04	1.33E+04	6.59E+03	6.61E+03	4.74E+03	1.06E+04	4.38E+05	4.63E+05	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Кадиоидная – удл.ПК	5.77E+03	5.78E+03	1.77E+04	1.33E+04	5.77E+03	5.80E+03	4.27E+03	9.87E+03	4.39E+05	4.62E+05	0.53	12.45	9.58	-1.97	0.30	12.45

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Величко Г.В., Филиппов В.В. Нормирование переходных кривых и контроль плавности трассы // Дороги і мости. 2006. № 4
2. Величко Г.В., Филиппов В.В. Сравнительные свойства переходных кривых. URL : <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/28ba3ec2-3d4d-4087-b8d8-a24a7de6296a> (дата обращения: 15.02.2025).
3. Белятынский А.А., Таранов А.М. Проектирование кривых при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. Киев : Выща школа, 1988.
4. Белятынский А.А., Чешуйко В.Н. Проектирование переходных кривых при реконструкции автомобильных дорог // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2007. № 2(25). С. 34–36.
5. Специальные технические условия. Проектирование участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч, № 14574-ЛС/03. Москва : Минстрой РФ, 2017.
6. Проектирование высокоскоростных специализированных железнодорожных магистралей : пособие по курсовому и дипломному проектированию / И.И. Кантор, В.А. Копыленко, В.Ю. Козлов, Л.В. Элькина. Москва : МИИТ, 1996. 67 с.
7. Чонка А.В. Расчет параметров кациоидных кривых // Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление. 2023. № 7(255). Рр. 93–98.
8. Программный комплекс «Универсальный механизм» (УМ) // Брянск: лаборатория вычислительного механизма. URL : <http://www.universalmechanism.com/> (дата обращения: 15.02.2025)
9. Аккерман Г.Л., Кравченко О.А. Сравнительный анализ переходных кривых с прямым и S-образным отводом возвышения // Вестник СГУПС. 2010. № 22. С. 82–86.
10. Аккерман Г.Л., Кошелев Д.А. Оценка возможности применения биклотовидного проектирования смежных кривых для движения высокоскоростных и тяжеловесных поездов методом имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2012. № 5. С. 3–9.
11. Аккерман Г.Л., Аккерман С.Г., Кравченко О.А. Биклотовидное проектирование криволинейных участков железной дороги // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 10. С. 20–30.
12. Прокопьева О.А., Журавская М.А. К вопросу создания энергосберегающих элементов транспортно-логистической инфраструктуры на примере биклотовидного проектирования // Инновационный транспорт. 2017. № 1. С. 3–7.
13. Persson R. Tilting trains: Benefits and motion sickness // Journal of Rail and Rapid Transit. 2008. № 224(6). Рр. 521–522.
14. European Committee for Standardization Brussels. CEN Railway Applications Ride Comfort for Passengers Measure and Evaluation. EN 12299:2009.

REFERENCES

1. Velichko G.V., Filippov V.V. Normirovanie perekhodnykh krivyykh i kontrol' pлавnosti trassy [Standardization of transition curves and control of route smoothness] // Dorogi i mosti. 2006. № 4.
2. Velichko G.V., Filippov V.V. Sravnitel'nye svoystva perekhodnykh krivyykh [Comparative properties of transition curves]. URL : <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/28ba3ec2-3d4d-4087-b8d8-a24a7de6296a> (data obrashcheniya: 15.02.2025).
3. Belyatynsky A.A., Taranov A.M. Proektirovanie krivyykh pri stroitel'stve i rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Design of curves in the construction and reconstruction of highways]. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988.
4. Belyatynsky A.A., Cheshuyko V.N. Proektirovanie perekhodnykh krivyykh pri rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Design of transition curves in the reconstruction of highways] // Avtomatizirovannye tekhnologii izyskanij i proyektirovaniya. 2007. № 2(25). S. 34–36.
5. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya. Proektirovanie uchastka Moskva-Kazan vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva-Kazan-Yekaterinburg so skorostyami dvizheniya do 400 km/ch. [Special technical conditions. Design of the Moscow-Kazan section of the high-speed railway Moscow-Kazan-Yekaterinburg with speeds of up to 400 km/h], № 14574-LS/03. Moskva : Minstroj RF, 2017.
6. Proektirovanie vysokoskorostnykh spetsializirovannykh zheleznodorozhnykh magistralej [Design of high-speed specialized railway lines] : posobie po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu / I.I. Kantor, V.A. Kopylenko, V.Yu. Kozlov, L.V. Elkina Moskva : MIIT, 1996. 67 s.
7. Chonka A.V. Raschet parametrov kadioidnykh krivyykh [Calculation of parameters of cadioidis curves] // Transport: logistika, stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie. 2023. № 7(255). S. 93–98.
8. Programmny kompleks «Universal'ny mekhanizm» (UM) [Software package "Universal mechanism" (UM)] // Bryansk: laboratoriya vychislitel'nogo mekhanizma. URL: <http://www.universalmechanism.com/> (data obrashcheniya: 15.02.2025).
9. Akkerman G.L., Kravchenko O.A. Sravnitel'nyj analiz perekhodnykh krivyykh s pryamym i S-obraznym otvodom vozvysheniya [Comparative analysis of transition curves with a straight and S-shaped elevation branch] // Vetnik SGUPS. 2010. № 22. S. 82–86.
10. Akkerman G.L., Koshelev D.A. Otsenka vozmozhnosti primeneniya biklotoidnogo proektirovaniya smezhnykh krivyykh dlya vysokoskorostnykh i tyazhelovesnykh poezdov metodom imitatsionnogo modelirovaniya [Evaluation of the possibility of using bi-clothoid design of adjacent curves for the movement of high-speed and heavy-haul trains using the simulation modeling method] // Zheleznodorozhny transport. 2012. № 5. S. 3–9.
11. Akkerman G.L., Akkerman S.G., Kravchenko O.A. Biklotoidnoye proektirovaniye krivolinejnykh uchastkov zheleznoj dorogi [Biclothoid design of curved railway sections] // Put' i putevye khozyaistvo. 2010. № 10. S. 20–30.

12. Prokopyeva O.A., Zhuravskaya M.A. K voprosu sozdaniya energosberegayushchikh elementov transportno-logisticheskoy infrastruktury na primere biklotoidnogo proektirovaniya [On the issue of creating energy-saving elements of transport and logistics infrastructure using biclothoid design as an example] // Innovatsionny transport. 2017. № 1. S. 3–7.

13. Persson R. Tilting trains: Benefits and motion sickness // Journal of Rail and Rapid Transit. 2008. № 224(6). Pp. 5213–522.

14. European Committee for Standardization Brussels. CEN Railway Applications Ride Comfort for Passengers Measure and Evaluation. EN 12299:2009.

Информация об авторах

А.В. Чонка – аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство»;

И.Л. Парахненко – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Путь и железнодорожное строительство».

Information about the authors

A.V. Chonka – Postgraduate Student, «Track and Railroad Construction» Department;

I.L. Parakhnenko – Candidate of Science (Engineering), Head of «Track and Railroad Construction» Department.

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принята к публикации 14.01.2025.

The article was submitted: 02.12.2024; approved after reviewing: 14.01.2025; accepted for publication: 14.01.2025.

О РАЗВИТИИ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

Эсаулов Вячеслав Александрович^{1,2}, Мединцев Евгений Викторович²

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, esaulov-87@mail.ru

² Центр управления перевозками на Восточном полигоне – структурное подразделение
Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», Хабаровск, medintsev_78@mail.ru

Аннотация. Увеличение экспортных потоков в направлении Азиатско-Тихоокеанского региона привело к необходимости развития направлений и станций Восточного полигона российских железных дорог. Одной из ключевых станций, соединяющих главный ход и рокадное направление Восточного полигона, находящихся на стадии реконструкции, является станция Известковая. Раскрывается способ организации тяжеловесного движения на участке главного хода Известковая–Находка (узел) после окончания ее реконструкции. Технологическое решение заключается в частичном изменении плеч оборота имеющегося в наличии парка четырехсекционных локомотивов. Потенциал предложения: ежесуточная экономия 1,6 ниток графика движения в направлении портов Дальнего Востока. Вместе с этим расчет показывает экономию 584 электровозов трехсекционного исполнения и 2336 локомотивных бригад в год по 4 депо на плече Известковая–Находка (узел), а также ускорение оборота тепловозов и локомотивных бригад на рокадном направлении Новый Ургал–Известковая.

Ключевые слова: повышение провозной способности, тяжеловесные поезда, моделирование перевозок, провозная способность, увеличение грузооборота, повышение устойчивости графика

Original article

ON THE DEVELOPMENT OF HEAVY TRAFFIC AT THE EASTERN TRAINING GROUND

Esaulov Viacheslav A.¹, Medintsev Evgeniy V.²

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, esaulov-87@mail.ru

² Transportation Control Center at the Eastern Region – territorial branch of the Central Directorate of Traffic Control – branch of JSC «RZD», Khabarovsk, medintsev_78@mail.ru

Abstract. The increase in export flows in the direction of the Asia-Pacific region has led to the need to develop the directions and stations of the Eastern Polygon of Russian Railways. One of the key stations connecting the main line and the bypass directions of the Eastern Polygon, which is under reconstruction, is Izvestkovaya station. The article reveals a method for organizing heavy-haul traffic on the section of the main line Izvestkovaya-Nakhodka (junction) after the completion of its reconstruction. The technological solution consists in a partial change in the turnover shoulders of the existing fleet of four-section locomotives. The potential of the proposal lies in daily savings of 1.6 threads of the traffic schedule in the direction of the ports of the Far East. At the same time, the calculation shows savings of 584 three-section electric locomotives and 2336 locomotive crews per year at 4 depots on the Izvestkovaya-Nakhodka (junction) shoulder, as well as acceleration of the turnover of diesel locomotives and locomotive crews on the Novy Urgal - Izvestkovaya bypass direction.

Keywords: increasing carrying capacity, heavy-haul trains, transportation modeling, carrying capacity, increasing freight turnover, increasing schedule stability

Введение

Решение стратегической задачи пропуска возрастающего объема грузопотока по контрольным сечениям Восточного полигона [1, 2] трудно представить без развития тяжеловесного движения. В пределах Восточного полигона увеличивается количество четырехсекционных локомотивов, способных проводить поезда массой 8250 т, а также трехсекционных локомотивов с поосным регулированием силы тяги с возможностью вождения поездов массой 7100 т. Повышению эффективности организации тяжеловесного движения посвящены работы многих российских исследователей [3–9].

В настоящей статье проведен анализ устойчивости графика движения грузовых поездов на участке Восточного полигона; выявлен решающий фактор, оказывающий негативное влияние на функционирование диспетчерского участка Новый Ургал–Известковая; представлен способ организации движения, способствующий повышению провозной способности главного хода Восточного полигона, увеличению пропуска грузопотока по контрольным сечениям, экономии ресурсов графика движения, а также повышению эффективности использования локомотивов и локомотивных бригад.

Оценка устойчивости графика движения на участке Новый Ургал–Известковая

В ходе исследования проведена оценка устойчивости графика движения для груженых составов на участке Новый Ургал–Известковая (Н–И) по статистическим данным, включающим в себя две выборки: 83 наблюдения в январе 2024 г., 99 наблюдений в июле 2024 г. Выбранные периоды имеют свои особенности операционной деятельности: январь характеризуется минимальным влиянием проводимых работ по ремонту и модернизации инфраструктуры на устойчивость графика движения; июль, в свою очередь, обладает благоприятными условиями для проведения работ по повышению качества содержания железнодорожного пути и контактной сети, при этом снижается пропускная способность направлений вследствие исключения возможности пропуска потока по участкам ремонта.

Анализ устойчивости графика движения проводился по двум параметрам: соблюдению расписания груженых составов, следующих со станции Новый Ургал (Н) на станцию Известковая (И), а также потерям, связанным с неграфиковыми стоянками поездов на промежуточных станциях, сопровождающимися сменами локомотивных бригад.

Диспетчерский участок включает в себя два сегмента: Новый Ургал–Тырма (Н–Т) и Тырма–Известковая (Т–И). На станции Т предусмотрена плановая смена локомотивной бригады, на станции И – технологичный размен локомотивной тяги с тепловозов на электровозы. Каждое наблюдение оценивалось по каждому сегменту. В январе по расписанию проследовал один поезд из 83 (1,2 %) со станции Н на Т и 4 поезда с Т на И (4,8 %); в июле по расписанию проследовал один поезд из 99 (1 %) со станции Н на Т, при этом с Т ни один поезд не проследовал по установленному графику до станции И.

В течение января на участке Н–Т зафиксировано 7 стоянок груженых составов на промежуточных станциях, сопровождающихся сменами локомотивных бригад, не предусмотренных графиком движения. В июле на участке Н–Т установлено 16 аналогичных стоянок, на участке Т–И – 2.

Параметры отклонений от расписания движения груженых составов и продолжительности времени стоянок поездов на промежуточных станциях, сопровождающихся сменами локомотивных бригад, не предусмотренных графиком движения, представлены в табл. 1.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод: график движения груженых составов на участке Н–И не обладает достаточной устойчивостью; процент следования поездов по расписанию находится на уровне, не превышающем 5 %. Отклонения от рас-

писания приводят к завышению оборота локомотивов и локомотивных бригад. Вместе с этим в ряде случаев задержки груженых составов сопровождаются сменами локомотивных бригад, что ведет к завышению их оборота. Общий простой на промежуточных станциях участка Н–И при нетехнологической смене бригады в январе составил 49,9 ч, в июле – 148,1 ч. Данные отклонения от ритмичного продвижения грузопотока приводят к нарушению графика движения по отправлению с технических станций участка, завышению норматива оборота вагона, увеличению рабочего парка дороги и другим негативным последствиям.

Таблица 1

Параметры отклонений от расписания и продолжительности времени стоянок со сменами локомотивных бригад на участке Новый Ургал–Известковая

Параметр	Сегмент Н–Т		Сегмент Т–И	
	Январь 2024 г.	Июль 2024 г.	Январь 2024 г.	Июль 2024 г.
<i>Отклонение от расписания</i>				
Максимальное, ч	23	23,8	5,9	6,9
Среднее, ч	2,7	2,6	1,3	1,9
Суммарное отклонение, ч	222,4	110,8	259,9	187,6
<i>Продолжительность стоянки на промежуточных станциях со сменами локомотивных бригад, не предусмотренных графиком движения</i>				
Минимальное, ч	1,3	1,7	...	2,7
Максимальное, ч	11,8	27,2	...	20,9
Среднее, ч	6,2	7,6	...	11,8
Общая продолжительность, ч	49,9	124,4	...	23,7

Систематические отклонения от расписания говорят о наличии решающего фактора, оказывающего влияние на устойчивость графика движения. Исключая эпизодически возникающие неисправности локомотивного, вагонного парков, устройств пути, автоматики и телемеханики, рассмотрим в качестве основного фактора неритмичный прием грузовых поездов станцией И.

Действительно, проведенный анализ работы станции И показывает, что технологическое время занятия приемоотправочных путей под операцией смены локомотивной тяги систематически завышается. В январе 2024 г. из 126 наблюдений только по 4 поездам (3,2 %) норматив времени выдержан; максимальное превышение времени составило 24 ч, среднее – 3,7 ч. В июле 2024 г. из 100 наблюдений по 6 поездам (6 %) технологическое время выполнено; максимальное превышение составило 15,4 ч, среднее – 3,7 ч.

Предложение по повышению эффективности продвижения груженого потока на участке Н–И

Проведенный анализ позволяет сделать вывод: превышение нормы времени занятия приемоотправочных путей на станции И под операцией смены локомотивной тяги у грузовых поездов является ключевым фактором, влияющим на эффективность продвижения груженого потока по участку Н–И.

Одним из методов сокращения простоя поездов на станции И может служить использование более мощных электровозов 4-секционного исполнения при одновременном формировании поездов весовой нормы 8250 т (параллельная норма для участков Транссибирской магистрали [10]) из прибывающих поездов со станции Н массой, не превышающей 6000 т (параллельная норма для участка Н–И [1]). В этом случае потенциально сократится потребность в электровозной тяге, что позволит ускорить освоение приемоотправочных путей станции И; повысить устойчивость графика движения на участке Н–И; ускорить оборот тепловозов; исключить стоянки поездов на промежуточных станциях, сопровождающиеся сменами локомотивных бригад, не предусмотренные графиком движения.

Анализ груженого поездопотока на участке Н–И

Для оценки возможности формирования грузовых поездов повышенной массы весовой нормы 8250 т на станции И необходимо провести анализ груженого поездопотока, следующего со станции Н на станцию И.

На рис. 1 представлена гистограмма процентного соотношения станций назначения относительно общего груженого поездопотока, следующего по участку Н–И.

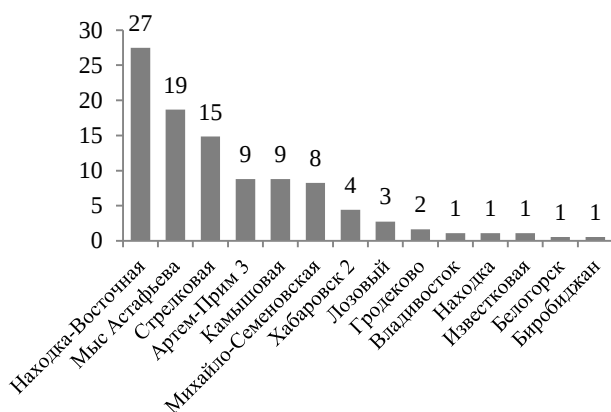


Рис. 1. Процентное соотношение станций назначения относительно общего груженого поездопотока, следующего по участку Н–И

Проведенным исследованием установлено, что больше 40 % всего груженого потока на участке Н–И составляют поезда, следующие в направлении припортовых станций Находка-Восточная (27 %) и Мыс Астафьева (19 %). При формировании поездов повышенной массы на станции И целесообразно

использовать потоки в направлении этих станций как наиболее мощные.

Способ организации тяжеловесного движения на участке Известковая–Находка (узел)

В перспективе 2027 г. размеры движения на участке Н–И составят 12 пар грузовых поездов. С учетом процентного соотношения станций назначения относительно общего груженого поездопотока (рис. 1), из 12 груженных составов, поступающих на станцию И, 3,2 поезда следуют на станцию Находка–Восточная (НВ), 2,3 поезда – на станцию Мыс Астафьева (МА). Предложение заключается в формировании поездов назначением НВ и МА массой 8250 т на станции И из поездов массой 5600–6000 т, поступающих с рокадного направления Н–И, после окончания реконструкции станции.

Подвязку локомотивов четырехсекционного исполнения целесообразно производить под порожние маршруты в направлении станции Улак (У), Февральск (Ф) и И со станций узла Находка с последующей их прицепкой под сформированные на станции И поезда массой 8250 т. Остаточное ТО-2 четырехсекционных локомотивов при отправлении со станций узла Находка должно быть достаточным для следования груженого состава до станции Смоляниново. Сформированные на станции И поезда повышенной массы необходимо уменьшить до весовой нормы 6300 т на станциях Бикин (накопление груза на станцию МА) и Губерovo (накопление груза на станцию НВ) без смены локомотива.

Схема организации тяжеловесного движения на участке Известковая–Находка (узел) представлена на рис. 2.

Расчет потребного парка 4-секционных локомотивов для организации тяжеловесного движения на участке Известковая–Находка (узел)

Оборот локомотива определяется по формуле

$$\theta_{\text{л}} = \frac{2L_{\text{уч}}}{v_{\text{уч}}} + t_{\text{осн}} + t_{\text{об}} + \sum t_{\text{см}}^{\text{бр}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{уч}}$ – длина участка обращения локомотивов (1206 км); $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость (38,5 км/ч); $t_{\text{осн}}$, $t_{\text{об}}$ – время нахождения локомотива на станциях основного и оборотного депо соответственно 4,46 и 2,6 ч; $\sum t_{\text{см}}^{\text{бр}}$ – суммарное время на смену локомотивных бригад в пунктах смены (4,8 ч).

Оборот локомотива составит 74,5 ч.

Определение потребного эксплуатируемого парка локомотивов произведем через коэффициент потребности локомотивов на пару поездов для каждого участка их обращения.

Нормирование эксплуатируемого парка локомотивов по коэффициенту потребности локомотивов на пару поездов осуществляется, исходя из оборота локомотивов.

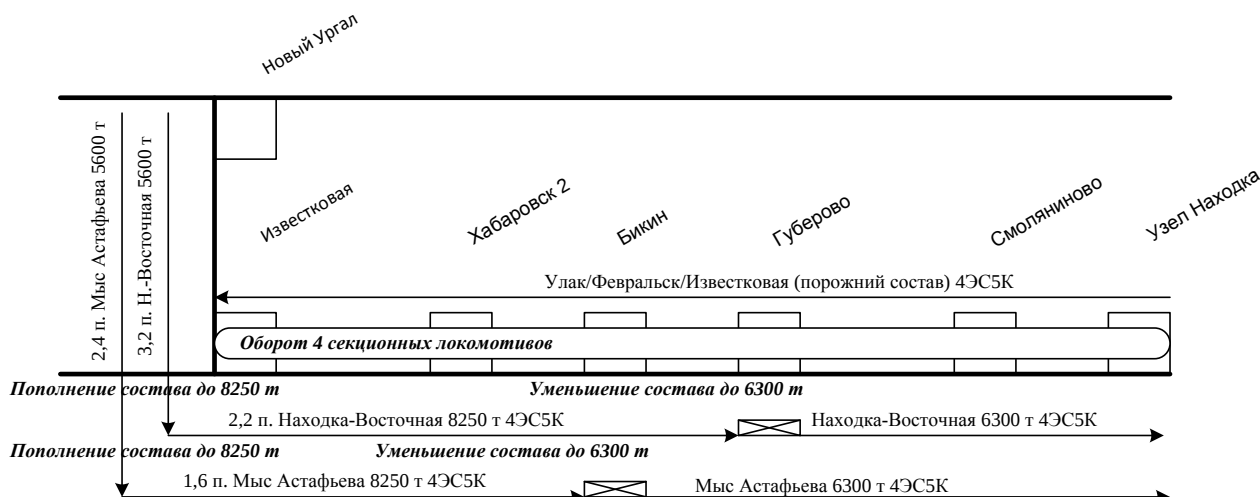


Рис. 2. Схема организации тяжеловесного движения на участке Известковая–Находка (узел)

Коэффициент потребности локомотивов на пару поездов

$$K_{\text{л}} = \frac{\theta_{\text{л}}}{24}, \quad (2)$$

и примет значение 3,1.

Потребный парк локомотивов определим формулой

$$M_{\text{э}} = K_{\text{л}} N_{\text{гр}} = \frac{\theta_{\text{л}}}{24} N_{\text{гр}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{гр}}$ – число пар грузовых поездов на участке.

Таким образом, для 2,2 поездов массой 8250 т в направлении станции Находка-Восточная потребность в 4-секционной тяге составит 7 локомотивов, для 1,6 поезда в направлении станции Мыс Астафьева – 5 локомотивов в сутки.

Общая суточная потребность в парке составит 12 четырехсекционных локомотивов для организации движения поездов массой 8250 т на участке Известковая–Находка (узел).

Прогнозируемые эффекты

Предлагаемый способ организации тяжеловесного движения на участке Известковая – Находка (узел) ведет к экономии потребного парка локомотивов на 1,8 единицы в сутки (5,6 легковесных по-

ездов переформируются в 3,8 тяжеловесных поезда в сутки); годовая экономия тяговых ресурсов составляет 657 локомотивов трехсекционного исполнения.

Участок Известковая–Находка (узел) включает в себя 4 пункта смены локомотивных бригад (Хабаровск II, Губерово, Ружино, Уссурийск). Таким образом, экономия локомотивных бригад составит $1,8 \cdot 4 = 7,2$ бригады в сутки, или 2628 бригад в год.

Вместе с этим экономия потребного парка локомотивов, а также прогнозируемая разность составности груженых и порожних поездов ведет к ускорению отправления вагонов со станции Известковая, ритмичному прибытию грузовых поездов с рокадного направления, ускорению оборота тепловозной тяги и локомотивных бригад на участке Новый Ургал–Известковая.

Вывод

Представленный в статье способ может стать одним из технологических решений, необходимых для решения общей задачи стратегического увеличения грузопотока, пропускаемого по контрольным сечениям к портам Восточного полигона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
2. IV Железнодорожный съезд. Перспективы на годы вперед // Железнодорожный транспорт. 2024. № 1. С. 2–8.
3. Сирина Н.Ф., Раевская П.Е. Выбор оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1(61). С. 53–61.
4. Каимов Е.В., Оленцевич А.А. Усиление пропускных мощностей Восточного полигона за счет увеличения количества длинносоставных поездов // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024) : сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 октября 2024 г. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2024. С. 44–47.
5. Фрибус А.А. О влиянии пропуска поездов повышенной массы и длины на технологические и конструктивные параметры приемоотправочных парков железнодорожных станций // Наука и молодежь XXI века : материалы Регионального форума. Новосибирск, 13–23 ноября 2023 г. В 2 ч. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2024. С. 17–21.

6. Климова Е.В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4. С. 19–23.
7. Сотников Е.А., Холодник П.С. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов на постоянной основе // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78, № 5. С. 259–265.
8. Эсаулов В.А. Методы совершенствования технологии пропуска грузовых поездов на грузонапряженном направлении железной дороги : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Эсаулов Вячеслав Александрович. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2023. 138 с.
9. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В.А. Эсаулов, Б.И. Давыдов, К.Н. Никитенко, А.Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 69–78.
10. Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Дальневосточной дирекцией тяги : утв. Центральной дирекцией тяги ОАО «РЖД» от 10.04.2024 г. № ЦТ-51. 5 с.

REFERENCES

1. Transportnaya strategiya RF na period do 2030 g. s prognozom na period do 2035 g. [Transport strategy of Russia for the period until 2030 with prognosis for the period until 2035] : utverzhdena rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-р.
2. IV Zheleznodorozhny s'ezd. Perspektivy na gody vpered [IV Railroad congress. Perspectives for years ahead] // Zheleznodorozhny transport. 2024. № 1. S. 2–8.
3. Sirina N.F., Raevskaya P.E. Vybór optimal'nogo varianta formirovaniya i regulirovaniya soedinennykh poezdov [Selection of the optimum option of forming and regulating combined trains] // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. № 1(61). S. 53–61.
4. Kaimov E.V., Olentsevich A.A. Usilenie propusknykh moshchnostej Vostochnogo poligona za schet uvelicheniya kolichestva dlinnosostavnykh poezdov [Strengthening throughput capacities of the Eastern polygon by means of increasing the quantity of long trains] // Upravlenie ekspluatatsionnoj pabotoj na transporte (UERT-2024) : sbornik trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konfrentsii, Sankt-Peterburg, 15–16 oktyabrya 2024 g. Sankt-Peterburg : Izd-vo PGUPS, 2024. S. 44–47.
5. Fribus A.A. O vliyanii propuska poezdov povyshennoj massy i dliny na tekhnologicheskie i konstruktivnye parametry priyomootpravochnykh parkov zheleznodorozhnykh stantsij [On the influence of the throughput of trains with increased mass and length on technological and constructive parameters of receiving and expedition parks of railway stations] // Nauka i molodezh' XXI veka : materialy regional'nogo foruma. Novosibirsk, 13–23 noyabrya 2023 g. V 2 ch. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2024. S. 17–21.
6. Klimova E.V. Metodika otsenki effektivnosti formirovaniya i propuska soedinennykh gruzovykh poezdov na uchastkakh i poligonakh zheleznykh dorog [Methods of efficiency evaluation of forming and throughput of combined cargo trains on railway sections and polygons] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. № 4. S. 19–23.
7. Sotnikov E.A., Kholodnyak P.S. Izmeneniya propusknoj i provoznoj sposobnostej vysokozagruzhennykh napravlenij pri organizatsii dvizheniya soedinennykh poezdov na postoyannoj osnove [Changes of throughput and carrying capacities of highly intensive directions when organizing the traffic of combined trains running on a constant basis] // Vestnik VNIIZhT 2019. Т. 78, № 5. С. 259–265.
8. Esaulov V.A. Metody sovershenstvovaniya tekhnologii propuska gruzovykh poezdov na gruzonapryazhennom napravlenii zheleznoj dorogi [Methods of improving the throughput technology for cargo trains on a cargo intensive direction of a railway] : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Esaulov Vyacheslav Aleksandrovich. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2023. 138 s.
9. Effektivnost' propuska sparennykh gruzovykh poezdov [Efficiency of throughput of coupled cargo trains] / V.A. Esaulov, B.I. Davydov, K.N. Nikitenko, A.G. Lazarev // Nauka i tekhnika transporta. 2022. № 2. S. 69–78.
10. Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskikh i gruzovykh poezdov na uchastkakh, obsluzhivaemykh Dal'nevostochnoj direksiej tyagi [On setting the norms of masses and lengths of passenger and cargo trains on sections serviced by the Far Eastern Traction Direction] : utv. Tsentral'noy direksiyey tyagi ot 10 aprelya 2024 g. № TsT-51. 5 s.

Информация об авторах

В.А. Эсаулов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность на транспорте», заместитель начальника Дальневосточного отдела логистики перевозок и информационного анализа;

Е.В. Мединцев – заместитель начальника Центра управления перевозками на Восточном полигоне – начальник Дальневосточного отдела логистики перевозок и информационного анализа.

Information about the authors

V.A. Esaulov – Ph.D. in technology, deputy head of the Far Eastern Department of Transportation Logistics and Information Analysis of the Transportation Control Center at the Eastern Region, associate professor;

E.V. Medintcev – deputy head of the Transportation Control Center at the Eastern Region – head of the Far Eastern Department of Transportation Logistics and Information Analysis

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.
The article was submitted: 02.12.2024; approved after reviewing: 16.12.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Серышева, 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